

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Daniel Pugar**

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Doc.dr.sc. Gojko Marić

Student:

Daniel Pugar

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Gojku Mariću na nesebičnoj pomoći, susretljivosti i brojnim savjetima prilikom izrade ovog rada

Također se zahvaljujem asistentu dipl.ing. Matiji Bušiću na velikoj pomoći i korisnim savjetima prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Želio bih se zahvaliti i tehničkom suradniku Božidaru Bušetinčanu na pomoći oko eksperimentalnog dijela rada, te doc.dr.sc Željku Alaru na pomoći i savjetima tijekom mjerenja udarnog rada loma u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava.

Zahvaljujem svojim roditeljima i djevojci Ana-Mariji na strpljenju i velikoj potpori koju su mi pružili tijekom studiranja preddiplomskog studija.

Daniel Pugar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Daniel Pugar**

Mat. br.: 0035179878

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **MOGUĆNOSTI SPAJANJA METALNIH PJENA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **POSSIBILITY OF JOINING METAL FOAMS**

Opis zadatka:

Metalne pjene predstavljaju potpuno novi oblik metalnih materijala, koja je još uvijek relativno nepoznata u inženjerskoj primjeni. To su metalni materijali čelijaste strukture, poroznosti 40 % do 90 %, niske gustoće (mase), relativno visoke krutosti, dobrih izolacijskih svojstava (zvuk, toplina), negorivosti, odlične apsorpcije energije udara itd.

Ukoliko bi željeli metalne pjene koristiti za izradu konstrukcijskih elemenata, što bi zbog izuzetno male gustoće bilo interesantno, morali bi se utvrditi načini spajanja.

U ovom radu potrebno je učiniti sljedeće:

- Opisati tehnologije izrade metalnih pjena s posebnim naglaskom na tehnologiju izrade pjenjenjem prekursora u kalupu.
- Opisati poznate načine spajanja dijelova načinjenih od metalnih pjena.
- Posebno se osvrnuti na spajanje lijepljenjem, lemljenjem i zavarivanjem.
- Načiniti veći broj identičnih uzoraka od Al pjene.
- Spojiti načinjene uzorke različitim načinima spajanja.
- Ispitati čvrstoću veze nastale spajanjem.

Komentirati rezultate.

Zadatak zadan:

16. studenog 2012.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Gojko Marić

Rok predaje rada:

1. rok: 15. veljače 2013.

2. rok: 11. srpnja 2013.

3. rok: 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.

2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.

3. rok: 18., 19. i 20. rujna 2013.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Struktura metalnih pjena .....	2
2. POSTUPCI PROIZVODNJE METALNIH PJENA .....	3
2.1. Plinom oslobođene čestice rastvorene u polukrutoj fazi.....	4
3. SVOJSTVA METALNIH PJENA .....	6
3.1. Mehanička svojstva metalnih pjena .....	7
3.2. Toplinska svojstva metalnih pjena .....	9
3.3. Akustična svojstva metalnih pjena.....	10
3.4. Prigušenje vibracija metalnih pjena .....	10
3.5. Električna svojstva metalnih pjena.....	11
4. SPAJANJE METALNIH PJENA.....	12
4.1. Vijčani spojevi .....	13
4.2. Lijepljenje metalnih pjena.....	14
4.3. Lemljenje metalnih pjena.....	15
4.4. Zavarivanje metalnih pjena .....	16
5. PRIMJENA METALNIH PJENA .....	18
6. EKSPERIMENTALNI DIO .....	23
6.1. Izrada aluminijskih pjena .....	23
6.2. Izrezivanje i označavanje uzoraka .....	31
6.3. Spajanje ispitnih uzoraka .....	35
6.3.1. Lijepljenje ispitnih uzoraka.....	35
6.3.2. Zavarivanje ispitnih uzoraka .....	43
6.3.3. Homogeni ispitni uzorci.....	47
6.4. Ispitivanje mehaničkih svojstava .....	48

---

6.4.1. Ispitivanje udarnog rada loma.....	48
6.4.1.1. Ispitivanje udarnog rada loma na lijepljenim uzorcima.....	49
6.4.1.2. Ispitivanje udarnog rada loma na zavarenim uzorcima .....	52
6.4.1.3. Ispitivanje udarnog rada loma na homogenim uzorcima.....	56
6.4.1.4. Ukupni prikaz rezultata i usporedba vrijednosti .....	58
7. ZAKLJUČAK.....	59
LITERATURA.....	61

## POPIS SLIKA

Slika 1. Komad izrađen od metalne pjene [2] .....	1
Slika 2. Mikrostruktura metalne pjene na elektronskom mikroskopu [4] .....	2
Slika 3. Shematski prikaz procesa nastajanja metalne pjene iz metalnog praha [6] .....	4
Slika 4. Sendvič konstrukcija s jezgrom od metalne pjene [7] .....	5
Slika 5. Metalne pjene ojačane mrežicom od nehrđajućeg čelika [9] .....	7
Slika 6. Povezivanje metalne pjene pomoću vijka i umetka [12] .....	13
Slika 7. Primjeri rastavljivog spajanja metalnih pjena [13] .....	13
Slika 8. Lasersko zavarivanje metalne pjene [11] .....	16
Slika 9. Urušavanje ćelijaste strukture kao rezultat prekomjernog dovođenja topline TIG zavarivanjem [11] .....	17
Slika 10. Primjeri zavarenih spojeva metalnih pjena [1] .....	17
Slika 11. Sendvič konstrukcija s jezgrom od metalne pjene [14] .....	19
Slika 12. Primjeri sendvič konstrukcija napravljenih od metalne pjene [15] .....	19
Slika 13. Na sajmu automobila u Detroitu 1998. godine, prikazana je potencijalna primjena sendvič konstrukcija na automobilskim karoserijama [16] .....	20
Slika 14. Metalne pjene u autoindustriji [9] .....	20
Slika 15. Plovak izrađen od metalne pjene [9] .....	21
Slika 16. Izmjenjivač topline napravljen od DUOCEL Al pjene [1] .....	21
Slika 17. Prigušivači zvuka od aluminijskih pjena [1] .....	22
Slika 18. Elektrootporna peć za proizvodnju metalnih pjena .....	23
Slika 19. Kalup (220x253x15 mm) .....	24
Slika 20. Prekursor od legure AlSi10 .....	24
Slika 21. Mjerenje mase prekursora .....	26
Slika 22. Punjenje kalupa prekursorom .....	27
Slika 23. Zatvaranje kalupa i stezanje vijcima .....	27
Slika 24. Stavljanje kalupa u peć .....	28
Slika 25. Kalup u peći .....	28
Slika 26. Kalup nakon vađenja iz peći .....	29
Slika 27. Otvaranje kalupa nakon završetka procesa .....	29
Slika 28. Ploče od aluminijskih pjena različite gustoće .....	30

Slika 29. Shematski prikaz izrezivanja ispitnih uzoraka iz ploče .....	31
Slika 30. Iscrtavanje uzoraka na ploči od aluminijske pjene .....	31
Slika 31. Izrezivanje uzoraka iz aluminijskih ploča.....	32
Slika 32. Shematski prikaz rezanja uzorka za lijepljenje i zavarivanje.....	32
Slika 33. Rezanje uzoraka ručnom pilom.....	33
Slika 34. Pripremljeni i pravilno označeni ispitni uzorci .....	34
Slika 35. Ispitni uzorci za lijepljenje .....	35
Slika 36. Ljepilo DP190 .....	37
Slika 37. Pištolj za ljepilo.....	38
Slika 38. Prikaz istisnutog ljepila .....	39
Slika 39. Miješanje ljepila .....	39
Slika 40. Nanošenje ljepila na ispitne uzorke .....	40
Slika 41. Ljepilo na čelijastoj površini koja se lijepi .....	40
Slika 42. Stezanje zalijepljenih ispitnih uzoraka.....	41
Slika 43. Zalijepljeni ispitni uzorci .....	41
Slika 44. Prikaz lijepljenog spoja .....	42
Slika 45. Ispitni uzorci za zavarivanje.....	43
Slika 46. Shema TIG postupka [21] .....	44
Slika 47. Uređaj za TIG zavarivanje .....	45
Slika 48. Zavareni ispitni uzorci.....	45
Slika 49. Prikaz zavarenog spoja.....	46
Slika 50. Homogeni ispitni uzorci.....	47
Slika 51. Charpy-ev bat .....	48
Slika 52. Postavljanje lijepljenih ispitnih uzorka na oslonce Charpy-evog bata.....	49
Slika 53. Lijepljeni ispitni uzorci nakon loma .....	50
Slika 54. Prikaz vrijednosti udarnog rada loma lijepljenih uzoraka u Joulima [J].....	51
Slika 55. Prikaz lijepljenog spoja nakon loma .....	51
Slika 56. Postavljanje zavarenog ispitnog uzorka na oslonce Charpy-evog bata .....	52
Slika 57. Zavareni ispitni uzorci nakon loma.....	52
Slika 58. Prikaz vrijednosti udarnog rada loma zavarenih uzoraka u Joulima [J] .....	53
Slika 59. Pukotina na ispitnom uzorku.....	54
Slika 60. Prikaz zavarenog spoja nakon loma.....	55
Slika 61. Postavljanje homogenog ispitnog uzorka na oslonce Charpy-evog bata .....	56



Slika 62. Homogeni ispitni uzorci nakon loma .....	56
Slika 63. Prikaz vrijednosti udarnog rada loma homogenih uzoraka u Joulima [J] .....	57
Slika 64. Ukupni prikaz vrijednosti udarnog rada loma u Joulima [J] .....	58

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva metalnih pjena [10].....	8
Tablica 2. Toplinska svojstva metalnih pjena [10].....	9
Tablica 3. Električna otpornost metalnih pjena [10].....	11
Tablica 4. Moguće primjene metalnih pjena [10].....	18
Tablica 5. Oznake izrađenih uzoraka.....	33
Tablica 6. Svojstva ljepila DP190 [19].....	38
Tablica 7. Parametri TIG zavarivanja.....	44
Tablica 8. Rezultati mjerenja udarnog rada loma lijepljenih uzoraka.....	50
Tablica 9. Rezultati mjerenja udarnog rada loma zavarenih uzoraka.....	53
Tablica 10. Rezultati mjerenja udarnog rada loma homogenih uzoraka.....	57
Tablica 11. Ukupni prikaz rezultata ispitivanja udarnog rada loma u Joulima [J].....	58

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$c_p$	J/kgK	specifični toplinski kapacitet
$E$	GPa	modul elastičnosti
$E_f$	GPa	modul savitljivosti
$g$	mm	širina ploče aluminijske pjene
$G$	GPa	modul smičnosti
$h$	mm	visina ploče aluminijske pjene
$H$		tvrdća
$I$	A	jakost struje
$K_{IC}$	MPa·m <sup>1/2</sup>	lomna žilavost
$KU$	J	udarni rad loma
$l$	mm	duljina ploče aluminijske pjene
$L$	kJ/kg	latentna toplota taljenja
$m$	kg	masa
$R_d$	MPa	dinamička izdržljivost
$R_e$	MPa	granica razvlačenja
$R_m$	MPa	vlačna čvrstoća
$R_{mt}$	MPa	tlačna čvrstoća
$S$		standardna devijacija
$T_m$	K	talište
$T_{max}$	K	maksimalna radna temperatura
$T_{min}$	K	minimalna radna temperatura
$V$	mm <sup>3</sup>	volumen
$\bar{x}$		aritmetička sredina
$\alpha$	10 <sup>-6</sup> /K	toplinska rastezljivost
$\varepsilon_D$		deformacija pri zgušnjavanju
$\varepsilon_f$		vlačna duktilnost
$\eta$		konstanta prigušenja
$\eta^c$	%	faktor gubitka
$\lambda$	W/mK	toplinska vodljivost
$\nu$		poissonov faktor
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća metalne pjene
$\rho/\rho_s$		relativna gustoća

## SAŽETAK

S ciljem smanjenja mase konstrukcijskih dijelova, te uštede resursa i energije, danas se sve više razvijaju suvremeni materijali. Pri tome, najviše se pažnje posvećuje strukturi materijala, te se sve više razvijaju ćelijasti materijali koji pokazuju kvalitetna svojstva. Metalne pjene su upravo te, koje predstavljaju novi oblik materijala koji se razvija na osnovi oponašanja strukture i svojstava prirodnih ćelijastih materijala. Međutim, glavni problemi u proizvodnji metalnih pjena proizlaze iz još nepotpunog ovladavanja parametrima procesa te načinima njihova spajanja. U prvom dijelu rada ukratko su opisane metalne pjene, navedeni su postupci njihove proizvodnje, te je detaljno opisan postupak proizvodnje metalnih pjena iz metalnog praha. Također su navedena najvažnija svojstva, načini spajanja, te područja primjene metalnih pjena. Drugi dio rada temelji se na mogućnostima spajanja metalnih pjena. Napravljene su dvije ploče od aluminijskih pjena, istog sastava, različite gustoće, te su iz njih izrezani ispitni uzorci (epruvete). Jedan dio ispitnih uzoraka prerezan je na pola te spojen različitim načinima nerastavljivih spojeva (lijepljenjem i zavarivanjem). Nakon što su uzorci spojeni provedena su ispitivanja s ciljem usporedbe mehaničkih svojstava nerastavljivih spojeva. Drugi dio ispitnih uzoraka nije rezan, već je ostavljen kao cijeli, homogeni uzorak. Na tim homogenim uzorcima također su provedena ispitivanja, te je napravljena usporedba svojstava homogenih uzoraka u odnosu na svojstva uzoraka spojenih nerastavljivim spojevima. Rezultati ispitivanja prikazani su tablično i grafički, te je na temelju njih donesen zaključak o mogućnostima spajanja metalnih pjena.

Ključne riječi: metalne pjene, spajanje, lijepljenje, zavarivanje

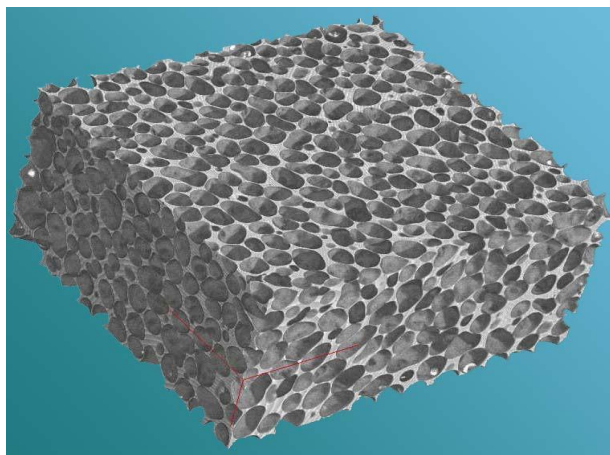
## SUMMARY

With the purpose of reducing weight of construction parts and saving resources and energy today, more than ever, contemporary materials are in the process of developing. The biggest attention is dedicated to the structure of materials and more than ever cellular materials are developing and showing quality characteristics. Metals foams are exactly those one which present new configuration of materials which has been developed on the base of imitating structure and characteristics of natural cellular materials. However, the main problems in production of metal foams are arising from lack of knowledge about controlling of process parameters and methods of their connection. In the first part of work, shortly are presented metal foams, processes of their manufacturing, and the way of manufacturing metal foams from metal dust has been described in detail. Also, the main characteristics, the way of connection, and grounds of use have been given. Second part of work is based on the possibility of joining metal foams. Two metal panels have been made of aluminium foam, whit same structure, but different density, and from them have been cut out test specimens. One part of test specimens has been cut on two parts and connected with different ways of inseparably compounds (adhesive bonding and welding). After it, test specimens were connected and testing was made with a purpose of comparing mechanical properties of inseparably compounds. Second part of test specimens has not been cut. This test specimens have been left like homogeneous specimens. On those homogeneous specimens testing has been also performed and properties were compared with properties of test specimens connected with inseparably compounds. The results of testing are demonstrated in the table chart and graphically and it has been made conclusion of possibility of joining metal foams.

Key words: metal foams, joining, adhesive bonding, welding

## 1. UVOD

Oponašanje prirodnih struktura te preuzimanje rješenja iz prirode jedan je od mogućih načina rješavanja problema u inženjerskoj praksi. U današnjem inženjerstvu teži se razvitku novih materijala niže gustoće, a jednakih uporabnih svojstava, kako bi se zamijenili postojeći materijali za određene konstrukcije, a sve to s ciljem smanjenja mase konstrukcija i uštede energije. U tu svrhu razvijene su metalne pjene u kojima se strukturom oponašaju prirodni šupljikavi, ćelijasti i porozni materijali kao npr. drvo, spužva, kamen, kost i koralji, čija su svojstva optimalno prilagođena okolnim uvjetima (slika 1). Naime, radi se o visokoporoznim ćelijastim materijalima koji se danas komercijalno proizvode najviše na bazi aluminijskih i niklovihi legura. Proizvode se još i metalne pjene od magnezija, olova, cinka, bakra, bronce, titana, čelika, pa čak i zlata. Osnovna svojstva metalnih pjena proizlaze od vrste materijala stijenki ćelija, oblika ćelija (zatvorene i otvorene) i procesa proizvodnje. Zbog svoje strukture metalne pjene posjeduju znatno kvalitetnija svojstva u odnosu na druge konstrukcijske materijale i stoga se svakim danom sve više primjenjuju. Karakteriziraju ih ekstremno niska gustoća i izvanredna kombinacija mehaničkih, električnih, toplinskih, i akustičnih svojstava. Unatoč sve većoj primjeni metalne pjene su još uvijek relativno nepoznate inženjerima. Intenzivna istraživanja metalnih pjena počela su tek unatrag 10-tak godina iako su prvi patent prijavljeni prije 50-tak godina. Metalne pjene izrađuju se novim procesnim tehnikama koje se iz dana u dan razvijaju i unapređuju. Glavni problem kod metalnih pjena je nedovoljno poznavanje parametara procesa izrade kao i način njihova spajanja. No, s obzirom na intenzivnost proučavanja metalnih pjena u narednih nekoliko godina očekuje se znatno povećanje količine ovih materijala na tržištu [1].

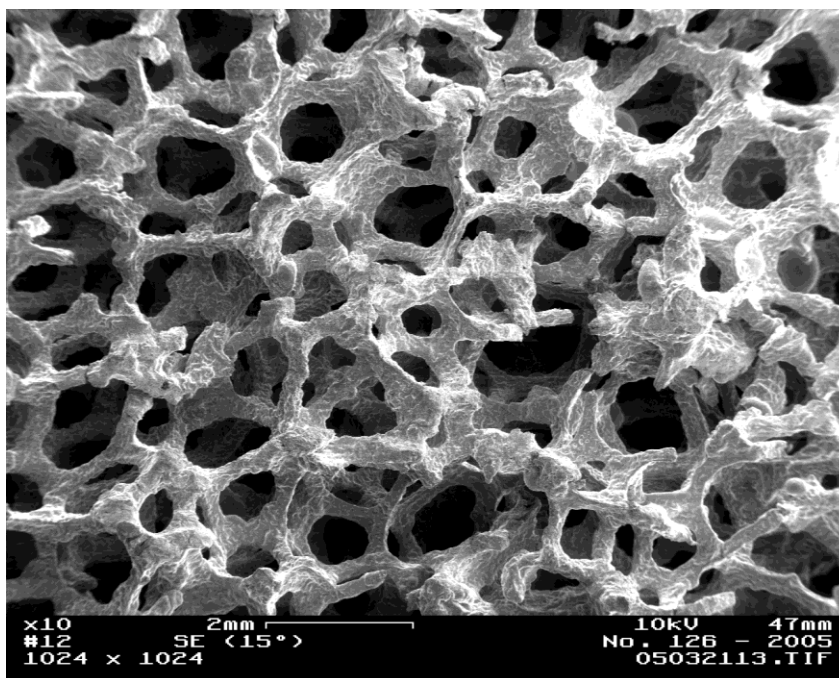


**Slika 1.** Komad izrađen od metalne pjene [2]

## 1.1. Struktura metalnih pjena

Oblik građe jedan je od najutjecajnijih čimbenika koji određuje svojstva, a vezano s tim i mogućnosti primjene metalnih pjena za različite konstrukcijske dijelove [3]. Oblik građe i njezin utjecaj na svojstva nisu u potpunosti proučeni dosadašnjim istraživanjima. Nakon boljeg razumijevanja tih utjecaja, otvaraju se mogućnosti za postizanje boljih svojstava i za upravljanje proizvodnjom metalnih pjena. Metalne pjene pojavljuju se u nekoliko oblika [1]:

- ćelijasti metali: unutar metalne mase nalaze se disperzirane, plinom ispunjene šupljine. Metalna faza dijeli prostor na zatvorene ćelije koje sadrže plinovitu fazu.
- porozni metali: poseban oblik ćelijastih metala koji se sastoji od određenog tipa šupljina. Poroznost metalnih pjena kreće se od 50 % do 90 %. Pore su okrugle i odvojene su jedne od drugih.
- čvrste metalne pjene: ovdje se također radi o posebnom obliku ćelijastih metala koji nastaju od tekućih metalnih pjena i imaju ograničenu morfologiju. Ćelije su okrugle, zatvorene ili poliedarskog oblika i odvojene su jedne od drugih tankim slojem.
- metalne spužve: morfologija ćelijastih metala s međusobno povezanim šupljinama.



**Slika 2.** Mikrostruktura metalne pjene na elektronskom mikroskopu [4]

## 2. POSTUPCI PROIZVODNJE METALNIH PJENA

Kako bi se ostvarila što bolja svojstva metalnih pjena nužno je pronalaženje novih, djelotvornijih i bolje upravljivih procesa za proizvodnju pjena. Danas je u svijetu poznato devet načina proizvodnje metalnih pjena. Pet od njih se nalazi u komercijalnoj upotrebi [1]. Svi ti načini proizvodnje dijele se u četiri šira područja:

- oblikovanje pjene taloženjem iz parne faze,
- oblikovanje pjene elektrotaloženjem iz tekuće faze,
- oblikovanje pjene u rastaljenoj fazi,
- oblikovanje pjene u čvrstoj fazi.

Načini proizvodnje metalnih pjena:

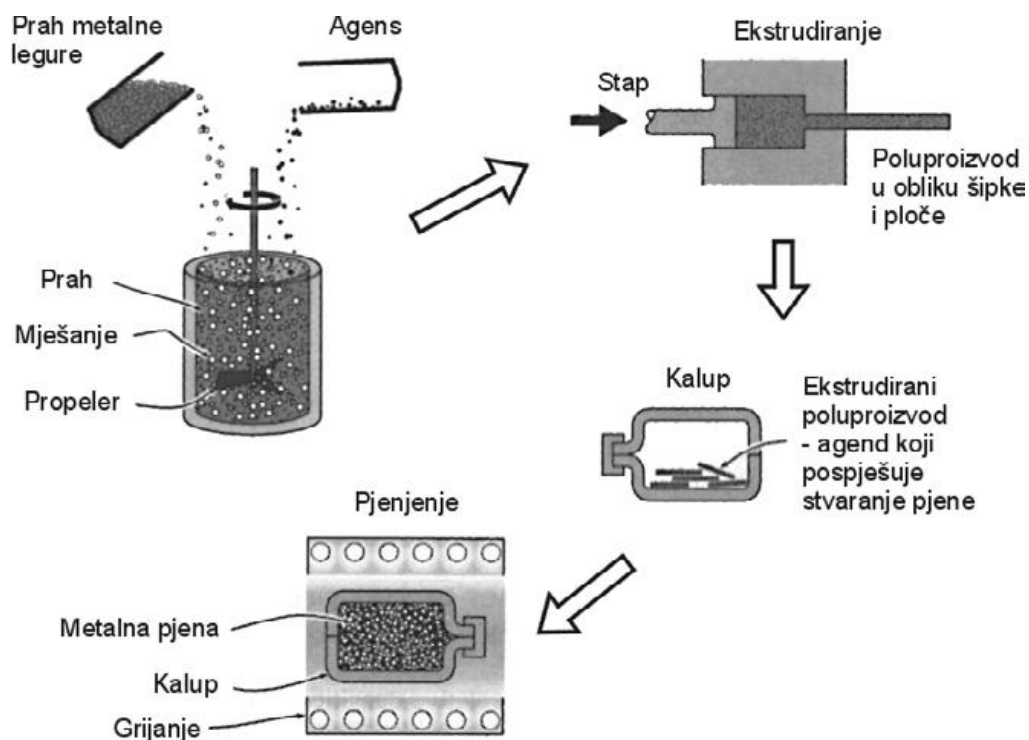
- ubrizgavanje plina u taljevinu
- plinom oslobođene čestice rastvorene u taljevini
- plinom oslobođene čestice rastvorene u polukrutoj fazi
- eutektičko skrućivanje plin - metal
- ćelijasti materijali s okruglim šupljinama
- spajanje ili lijevanje dvaju materijala od kojih je jedan topljiv
- precizno lijevanje pomoću kalupa od voska ili polimera
- taloženje metala na ćelijaste praoblake
- ekspanzija plina u taljevini

Svakim od tih devet postupaka može se djelomično utjecati na oblik, veličinu i stupanj otvorenosti ćelija te na relativnu gustoću [1]. Neke metode su adekvatne za proizvodnju velikih ploča i blokova. Druge metode su pogodnije za proizvodnju pjenastih dijelova složenijeg oblika. Ovisno o traženim svojstvima odabire se najpogodnija tehnologija izrade. Metalne pjene mogu biti proizvedene i izravno iz rastaljenog metala. Porozni materijal se formira ili ubrizgavanjem plina u rastaljeni metal ili lijevačkim metodama, koristeći polimerne pjene za nastanak strukture. Međutim, od svih postupaka proizvodnje najzastupljenija je proizvodnja metalnih pjena iz metalnog praha, te će ona biti pobliže opisana.



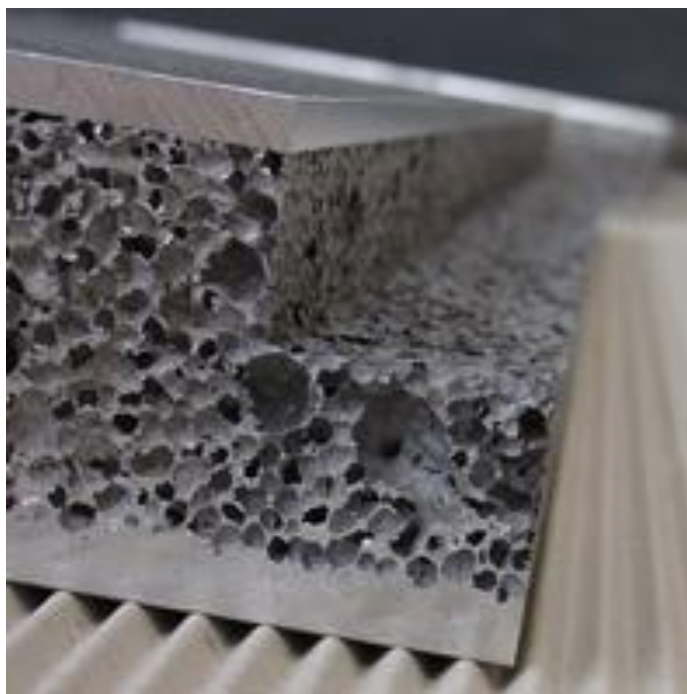
## 2.1. Plinom oslobođene čestice rastvorene u polukrutoj fazi

Pjenasti metal također se može proizvesti iz metalnog praha (slika 3). Na početku procesa miješaju se prah čistog metala ili legure, najčešće aluminija, i dodatak (agens) koji pospješuje upjenjavanje. Kao dodatak najčešće se koristi titanijev hidrid ( $\text{TiH}_2$ ). Nastala mješavina se sabija u poluproizvod u obliku šipke ili pločice. Tehnike sabijanja u metalnu matricu mogu biti razne: izostatičko tlačenje, ekstrudiranje, valjanje praha itd. [1] Poluproizvod se reže na manje komade i stavlja u kalup željenog oblika gdje se zagrijava na temperaturu nešto višu od solidus temperature legure. Dodatak (agens) se raspada na Ti i plinoviti  $\text{H}_2$  koji uzrokuje širenje i stvaranje visoko poroznog materijala. Trajanje procesa ovisi o temperaturi i veličini poluproizvoda i kreće se od nekoliko sekundi do nekoliko minuta. Proizvod poprima oblik kalupa, ima relativnu gustoću od  $0,08 \text{ g/cm}^3$  naviše i zatvorene ćelije promjera 1 do 5 mm. Upjenjavanje se događa u polučvrstom stanju zato što se  $\text{TiH}_2$  raspada na  $465^\circ\text{C}$  što je mnogo niže od tališta aluminija ( $660^\circ\text{C}$ ). Sve to pospješuje upjenjavanje čvrstog aluminija koji se zatim zagrijava do taljenja. Hlađenjem se pjena stabilizira [5].



**Slika 3.** Shematski prikaz procesa nastajanja metalne pjene iz metalnog praha [6]

Ovaj postupak proizvodnje metalnih pjena nije ograničen samo na aluminij, već se njime mogu proizvoditi pjene na bazi cinka, mjedi, olova, zlata i drugih metala ovisno o početnim parametrima. Fraunhoferov institut u Bremenu (Institut für Advanced Materials - IFAM) razvio je izradu sendvič-konstrukcija ovim postupkom (slika 4). Takve konstrukcije sastoje se od jezgre od upjenjenog metala zatvorene s dva metalna lima (ploče) koji su ljepilom povezani s pjenom. Ako se zahtijeva metalna veza između slojeva, limovi od čelika, aluminija ili titana valjanjem zatvaraju jezgru od pjenovitog poluproizvoda. Takva se konstrukcija oblikuje te zatim zagrijava čime se širi samo poluproizvod i stvara jezgra od metalne pjene. Prilikom proizvodnje ovakvih sendvič-konstrukcija treba se izbjeći taljenje limova od čistog metala. Sendvič-ploče mogu biti dimenzija 2×1 m. Komercijalni naziv za ovako proizvedene metalne pjene je FOAMINAL- ALULIGHT [6].



**Slika 4.** Sendvič konstrukcija s jezgrom od metalne pjene [7]

### 3. SVOJSTVA METALNIH PJENA

Prilikom odabira materijala za neki proizvod vrlo je važno znati sve podatke o svojstvima toga materijala. Na svojstva samog materijala utječu: građa (struktura), kemijski sastav te način izrade i obrade. Uz to, vrlo su bitne dimenzije i način pripreme uzorka za ispitivanje.

Glavna karakteristika metalnih pjena je vrlo visoka poroznost koja se kreće od 40 do 90%. U odnosu na druge konstrukcijske materijale metalne pjene imaju mnoge prednosti. Imaju malu gustoću, obično između 25 i 90% nižu u usporedbi s odgovarajućim masivnim materijalima, te imaju nisku specifičnu masu ( $250-1000 \text{ kg/m}^3$ ) [5].

Također, metalne pjene imaju visoku krutost u sendvič konstrukcijama, visoku sposobnost apsorpcije energije udara, dobro prigušenje mehaničkih vibracija i zvuka [8]. Ova svojstva možemo pripisati ćelijastoj strukturi.

Metalne pjene imaju prilagodljiva toplinska svojstva – ovisno o strukturi (otvorene ili zatvorene ćelije) mogu biti jako dobri toplinski izolatori ili mogu dobro provoditi toplinu. Važna karakteristika je i vatrootpornost, te svojstvo da prilikom izlaganja vatri ne oslobađaju otrovne plinove. Također, još neka od dobrih svojstava su električna vodljivost, otpornost na koroziju, recikličnost itd. [5].

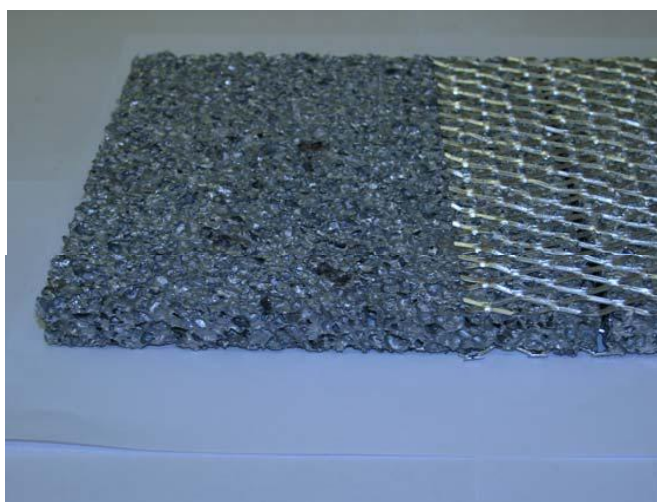
Postupci ispitivanja metalnih pjena još se razvijaju, i zbog svoje kompleksnosti, predstavljaju pravi izazov za inženjere. Zbog svoje vrlo nepredvidive građe dolazi do razlika u rezultatima pri istom načinu ispitivanja ponekad čak i za nekoliko desetaka postotaka.

### 3.1. Mehanička svojstva metalnih pjena

Prilikom ispitivanja raznih svojstava postoji velika razlika između svojstva metalnih pjena i svojstva metala od kojeg su pjene dobivene.

Svojstva metalnih pjena određena su svojstvima osnovnog materijala i relativnom gustoćom  $\rho/\rho_s$ , gdje je  $\rho$  gustoća pjene a  $\rho_s$  gustoća materijala od kojeg je pjena napravljena. Najveća prednost metalnih pjena je njihova vrlo mala masa. Zahvaljujući tome mogu se izraditi lake konstrukcije, s kojima ostvarujemo velike uštede u masi. Takve konstrukcije su u eksploataciji izložene raznim statičkim i dinamičkim opterećenjima, pa je stoga nužno što točnije i preciznije odrediti mehanička svojstva kako bi se mogao odabrati najprikladniji materijal za neku konstrukciju. Veliki problem predstavljaju nepravilnosti i nehomogenosti građe pjene. Čelije su najčešće nepravilnog oblika, različite veličine, te velike poroznosti. Kako bi se dobili što reprezentativniji podaci važan je izbor i dobra priprema uzorka. Pjene s otvorenim i zatvorenim ćelijama imaju približno jednaka svojstva, no ipak otvorene ćelije pokazuju nešto niže vrijednosti vlačne i tlačne čvrstoće [1].

Mehanička svojstva metalnih pjena mogu se značajno poboljšati ukoliko se one kombiniraju sa drugim strukturama. Mogu se ojačati mrežicom od nehrđajućeg čelika (slika 5). Ojačanjem se povećavaju vlačna i savojna čvrstoća, lomna žilavost, savojna krutost, sprječava se urušavanje ćelija, olakšava se spajanje itd. Također se koriste i sendvič konstrukcije s jezgrom od aluminijske pjene i vanjskim aluminijskim limovima [5].



**Slika 5.** Metalne pjene ojačane mrežicom od nehrđajućeg čelika [9]

Metalne pjene imaju širok raspon svojstava, te sukladno tome imaju veliko područje primjene u uvjetima mehaničkog opterećenja. U tablici 1 navedene su vrijednosti mehaničkih svojstava metalnih pjena nekoliko najpoznatijih svjetskih proizvođača.

**Tablica 1.** Mehanička svojstva metalnih pjena [10]

SVOJSTVO, SIMBOL, JEDINICA	MATERIJAL				
	CYMAT Al-SiC	ALULIGHT Al	ALPORAS Al	ERG Al	INCO Ni
Relativna gustoća, $\rho/\rho_s$	0,02-0,2	0,1-0,35	0,08-0,1	0,05-0,1	0,03-0,04
Grada	Zatvorene ćelije			Otvorene ćelije	
Gustoća, $\rho$ , Mg/m <sup>3</sup>	0,07-0,56	0,3-1,0	0,2-0,25	0,16-0,25	0,26-0,37
Modul elastičnosti, E, GPa	0,02-2,0	1,7-12	0,4-1,0	0,06-0,3	0,4-1,0
Modul smičnosti, G, GPa	0,001-1,0	0,6-5,2	0,3-0,35	0,02-0,1	0,17-0,37
Modul savitljivosti, $E_f$ , GPa	0,03-3,3	1,7-12	0,9-1,2	0,06-0,3	0,4-1,0
Poissonov faktor, $\nu$	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34
Tlačna čvrstoća, $R_m$ , MPa	0,04-7,0	1,9-14	1,3-1,7	0,9-3,0	0,6-1,1
Granica razvlačenja, $R_e$ , MPa	0,04-7,0	2,0-20	1,6-1,8	0,9-2,7	0,6-1,1
Vlačna čvrstoća, $R_m$ , MPa	0,05-8,5	2,2-30	1,6-1,9	1,9-3,5	1,0-2,4
Dinamička izdržljivost, $R_d$ , MPa	0,02-3,6	0,95-13	0,9-1,0	0,45-1,5	0,3-0,6
Deformacija pri zgušnjavanju, $\varepsilon_D$	0,6-0,9	0,4-0,8	0,7-0,82	0,8-0,9	0,9-0,94
Vlačna duktilnost, $\varepsilon_f$	0,01-0,02	0,002-0,04	0,01-0,06	0,1-0,2	0,03-0,1
Faktor gubitka, $\eta^c$ , %	0,4-1,2	0,3-0,5	0,9-1,0	0,3-0,5	1,0-2,0
Tvrdoća, H	0,05-10	2,4-35	2,0-22	2,0-3,5	0,6-1,0
Lomna žilavost, $K_{IC}$ , MPa·m <sup>1/2</sup>	0,03-0,5	0,3-1,6	0,1-0,9	0,1-0,28	0,6-1,0

### 3.2. Toplinska svojstva metalnih pjena

Kao i na sva ostala svojstva i na toplinska znatno utječe građa pjena, osobito relativna gustoća. Postoje velike razlike u svojstvima pjena s otvorenim i zatvorenim ćelijama. Ovisno o strukturi (otvorene ili zatvorene ćelije) metalne pjene mogu biti jako dobri toplinski izolatori ili pak mogu dobro provoditi toplinu.

Koeficijent toplinske vodljivosti ( $\lambda$ ) najbolje pokazuje izolacijske sposobnosti materijala. Vrijednost  $\lambda$  kod metalnih pjena sa zatvorenim ćelijama varira od 0,2 sve do 11 W/mK, što je i do 100 puta manje od vodljivosti čistog aluminija. Ovaj podatak nam pokazuje da pjene mogu biti vrlo dobar izolator. Nasuprot tome metalne pjene s otvorenim ćelijama odlično provode toplinu i koriste se u izradi izmjenjivača topline. Važna karakteristika je i vatrootpornost, te činjenica da prilikom izlaganja vatri ne oslobađaju otrovne plinove [1].

U tablici 2 navedene su vrijednosti toplinskih svojstava metalnih pjena nekoliko poznatih svjetskih proizvođača.

**Tablica 2.** Toplinska svojstva metalnih pjena [10]

SVOJSTVO, SIMBOL, JEDINICA	MATERIJAL				
	CYMAT Al-SiC	ALULIGHT Al	ALPORAS Al	ERG Al	INCO Ni
Relativna gustoća	0,02-0,2	0,1-0,35	0,08-1,0	0,05-0,1	0,03-0,4
Građa	Zatvorene ćelije			Otvorene ćelije	
Talište, $T_m$ , K	830-910	840-850	910-920	830-920	1700-1720
Maks. radna temperatura, $T_{max}$ , K	500-530	400-430	400-420	380-420	550-560
Min. radna temperatura, $T_{min}$ , K	1-2				
Specifični topl. kapacitet, $C_p$ , J/kgK	830-870	910-920	830-870	850-950	450-460
Toplinska vodljivost, $\lambda$ , W/mK	0,3-10	3,0-35	3,5-4,5	6,0-11	0,2-0,3
Toplinska rastezljivost, $\alpha$ , $10^{-6}/K$	19-21	19-23	21-23	22-24	12-14
Latentna toplota taljenja, $L$ , kJ/kg	355-385	380-390	370-380	380-395	280-310

### 3.3. Akustična svojstva metalnih pjena

Metalne pjene posjeduju dobra zvučna svojstva zbog činjenice da mogu apsorbirati veliku količinu energije. Metalna pjena mora imati otvorene ili poluotvorene ćelije kako bi dobro apsorbirala zvuk. Apsorpcija zvuka može se poboljšati, i to bušenjem rupa promjera 1 - 2 mm u metalnoj pjeni [1]. Neki proizvođači navode da, u pogledu apsorpcije zvuka, metalne pjene imaju mnoge prednosti u odnosu na staklenu vunu:

- staklena vuna nije dovoljno kruta tako da se mora ustabiliti metalnom armaturom,
- vlakna staklene vune mogu biti uništena pod utjecajem vibracija i vjetra,
- staklena vuna pod utjecajem visoke temperature oslobađa otrovne plinove,
- staklena vuna puno brže upija vlagu,
- metalna pjena se puno lakše montira zbog svoje vrlo male mase.

### 3.4. Prigušenje vibracija metalnih pjena

Prigušenje je vrlo važno svojstvo dijelova konstrukcija koji su tijekom eksploatacije izloženi vibracijama (npr. dijelovi strojeva za preciznu obradu itd.). Princip ispitivanja je takav da se materijal izloži vibracijama te se proučava ponašanje u rezonanci nakon prestanka rada izvora vibracije. Kao i kod ispitivanja drugih svojstava metalnih pjena i ovdje je problem nehomogena struktura uzoraka. Na rezultate ispitivanja utječu stupanj poroznosti, veličina i oblik ćelija, način obrade uzorka itd [1].

Procesi prigušenja u materijalu najbolje su karakterizirani bezdimenzionalnim koeficijentom gubitka  $\eta$ . Ćelijasti materijali pokazuju više vrijednosti faktora gubitka od faktora gubitka materijala pune gustoće. Rasipanje vibracija rezultat je trenja između površina ćelija i nastajanja mikronapuklina. Prigušenje se može povisiti smanjenjem debljine stijenki ćelija, te uvođenjem strukturnih nepravilnosti – npr. dodavanjem netopljivih keramičkih čestica. Unatoč svemu, faktor gubitka ćelijastih metala premalen je u usporedbi sa standardnim materijalima za prigušenje vibracija, čije se vrijednosti  $\eta$  kreću od 0,01 do 0,1 [1].

### 3.5. Električna svojstva metalnih pjena

Metalne pjene su električni vodiči, za razliku od polimernih i keramičkih pjena. Sva svojstva metalnih pjena ovise o relativnoj gustoći, pa tako i električna vodljivost i električna otpornost. Električni otpor i električna vodljivost vrlo su važna svojstva kada se metalne pjene koriste za izradu baterija za što su posebno pogodne niklene pjene [1].

U tablici 3 prikazane su vrijednosti električne otpornosti metalnih pjena.

**Tablica 3.** Električna otpornost metalnih pjena [10]

SVOJSTVO	MATERIJAL				
	CYMAT Al-SiC	ALULIGHT Al	ALPORAS Al	ERG Al	INCO Ni
Relativna gustoća	0,02-0,2	0,1-0,35	0,08-0,1	0,05-0,1	0,03-0,04
Građa (tip ćelija)	Zatvorene			Otvorene	
Električna otpornost, ( $10^{-6}\Omega\text{m}$ )	90-3000	20-2000	210-250	180-450	300-500



#### 4. SPAJANJE METALNIH PJENA

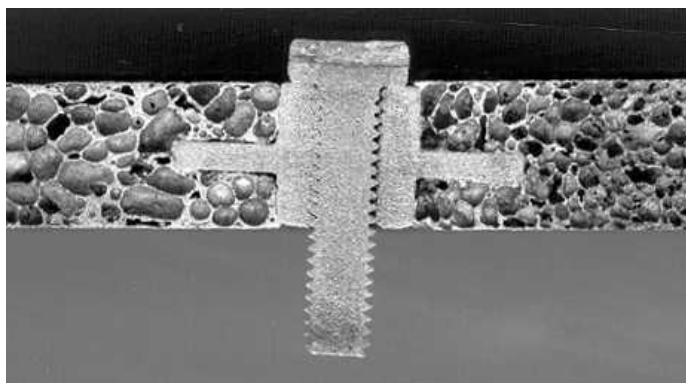
Jedno od najvećih ograničenja u proizvodnji metalnih pjena je raspon dimenzija ploča. Uz proizvodnju, glavni problem kod metalnih pjena predstavljaju i načini njihova povezivanja. Zbog malih raspona dimenzija, kao i zbog raznih konstrukcijskih rješenja vrlo je važno spajanje manjih segmenata kako bi dobili dijelove većih dimenzija. Stoga su postupci spajanja metalnih pjena veoma važni. Zbog specifične ćelijaste strukture koja određuje pozitivna svojstva za primjenu, sama svojstva materijala u spoju ne bi trebala značajno odstupati od svojstava osnovnog materijala. Svojstva koja su bitna, i zbog kojih se metalna pjena koristi kao osnovni materijal, moraju u samom spoju biti ista ili bolja nego u osnovnom materijalu. Treba spomenuti da porozna građa znatno otežava spajanje metalnih pjena, pa su nužne posebne tehnike spajanja. Usporedno s usavršavanjem postupaka proizvodnje razvijaju se i razne metode spajanja metalnih pjena međusobno i spajanja sa homogenim neporoznim metalima. Tehnologije koje se koriste za spajanje metalnih pjena su:

- vijčani spojevi,
- lijepljenje,
- lemljenje i
- zavarivanje

Bilo koja metoda rastavljivih spojeva koja se koristi za spajanje metalnih pjena mora ispuniti dva osnovna zahtjeva. Prvi zahtjev je da temperatura pri spajanju treba biti niža od temperature taljenja metalne pjene. Ako je temperatura viša i dolazi do taljenja materijala, onda se taljenje mora ograničiti samo na usku zonu oko spoja i dovoljno plitku zonu da ne dođe do urušavanja ćelijaste strukture. Ako se pri spajanju koristi tlačna sila onda ta sila po jedinici površine mora biti manja od čvrstoće metalne pjene kako ne bi došlo do deformiranja ćelijaste strukture [11].

#### 4.1. Vijčani spojevi

Vijčani spojevi spadaju u grupu rastavljivih spojeva koji se kod metalnih pjena ostvaruju pomoću drvenih vijaka ili pomoću metalnih umetaka u koje je urezan navoj (slika 6). Ako se koristi umetak, najčešće od bakra, nužno je postići dobro spajanje s metalnom pjenom. To se može postići uporabom ljepila, umetanjem spojnice tijekom proizvodnog procesa ili korištenjem punila. Umetanje spojnice se rijetko koristi jer ne zadovoljava željena svojstva. Kao punilo koristi se materijal koji ima sposobnost upijavanja, te ima niže talište od metalne pjene u koju se stavlja umetak. Kad se uloži punilo, cijeli sklop treba zagrijati. Tijekom zagrijavanja dolazi do upijavanja punila koje povezuje umetak i osnovnu metalnu pjenu [1]. Kod ovakvih spojeva, čvrstoća samog spoja ovisi o promjeru vijka, sili stezanja, promjeru provrta, gustoći metalne pjene, debljini stjenke ćelije, te prisutnosti ili odsutnosti površinske kore na pjeni. Za dobar vijčani spoj potrebno je da je dodirna površina između vijka i pjene što veća. Zbog toga je poželjno da je vijak što veći, te da je promjer predbušenog provrta što manji. Čvrstoća samog spoja može se povećati ljepilom ubrizganim u provrt prije umetanja vijka [11].



**Slika 6.** Povezivanje metalne pjene pomoću vijka i umetka [12]



**Slika 7.** Primjeri rastavljivog spajanja metalnih pjena, [13]

## 4.2. Lijepljenje metalnih pjena

Lijepljenje metalnih pjena moguće je ljepilima koja su namijenjena za lijepljenje određenih metala ili poroznih materijala. Spojevi se mogu vrlo jednostavno pripremiti i izvesti. Čvrstoća samog ljepila može biti čak i veća od čvrstoće metalne pjene. Za spajanje metalnih pjena lijepljenjem najčešće se rabe epoksidna ljepila, premda se mogu koristiti i poliuretanska ili polipropilenska ljepila [11].

Lom konstrukcije zalijepljene ljepilom uvijek se događa unutar same metalne pjene pored mjesta spajanja, zbog toga što je čvrstoća skrutnutog ljepila veća od čvrstoće same metalne pjene. Zbog ćelijaste strukture metalnih pjena, kod lijepljenja se javlja jedan specifični problem. Naime, udio ravne površine na koju nanosimo ljepilo jako je mali, a još je manja vjerojatnost da će se, prilikom spajanja, te dvije ravne površine poklopiti. Zbog toga, prilikom lijepljenja, moguće je između dva komada od pjene postaviti homogenu pločicu kako bi se veza ostvarila između pjene i punog materijala od kojeg je pjena načinjena, što omogućuje drugačija svojstva spoja nego kad se direktno lijepe dvije metalne pjene. Lijepljenje kao tehnologija spajanja metalnih pjena ima i negativnih svojstava [11]:

- neotpornost na visoke temperature,
- kraći vijek trajanja zbog starenja ljepila, odnosno spoja,
- stvaranje električne izolacije u spoju,
- povećanje toplinske izolacije u spoju,
- veća potrošnja ljepila zbog ispunjavanja ćelija pri lijepljenju pjena bez površinske kore.

Spajanje lijepljenjem najčešće se upotrebljava pri izradi sendvič konstrukcija s jezgrom od metalne pjene gdje se jezgra oblaže limom od homogenog materijala. Za praktičnu primjenu sendvič ploča od aluminijskih pjena potrebno je postići adhezijsku čvrstoću između pjene i površinskog lima veću od same čvrstoće aluminijske pjene [11].

### 4.3. Lemljenje metalnih pjena

Glavni problem prilikom lemljenja aluminijskih pjena je sloj  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oksida na površini. Prije početka lemljenja nužno je uklanjanje oksida i svih nečistoća sa površina koje se povezuju, kako bi se mogle ostvariti adhezijske sile. To se ostvaruje ili mehaničkim putem ili kemijski. Mehaničko uklanjanje oksida unutar pora aluminijskih pjena praktički nije izvedivo, zbog oblika i veličina pora te razlika u dimenzijama pora. Zbog toga je uklanjanje sloja oksida unutar pora moguće izvesti samo pomoću talila. Preporuča se da se talila koriste samo na površinama aluminijskih pjena. U slučaju da se talilo koristi unutar pora može doći do zaostajanja talila, koje kasnije može uzrokovati koroziju oko zalemljenog spoja [12]. Korištenje talila kod lemljenja površinske kore aluminijskih pjena nema nikakva ograničenja ukoliko je otjecanje talila sa površine koja se lemi neometano.

Kao dodatni materijal za lemljenje aluminijskih pjena koriste se lemovi: Sn90Zn (talište  $250^\circ\text{C}$ ), Cd82Zn (talište  $300^\circ\text{C}$ ), Sn70Zn (talište  $350^\circ\text{C}$ ) i Zn90Sn (talište  $420^\circ\text{C}$ ) [12]. Prije samog lemljenja aluminijska pjena mora se ugrijati na temperaturu taljenja lema. Predgrijavanje može biti izvedeno ili lokalno plinskim plamenom samo na mjestu na kojem se izvodi lemljeni spoj ili tako da se čitav element aluminijske pjene predgrijava na ploči ispod koje se nalaze raspoređeni električni grijači ili plinski plamenici. Kontrolirano predgrijavanje čitavog elementa na ploči bolje je jer sprječava prekomjeren unos topline na mjestu lemljenja (što bi moglo dovesti do taljenja metalne pjene) [11].

#### 4.4. Zavarivanje metalnih pjena

Metalne pjene mogu se zavarivati, ako je zavarljivost osnovnog materijala od kojeg je građena pjena zadovoljavajuća. Osim o osnovnom materijalu zavarljivost ovisi i o veličini i obliku ćelija, te o gustoći metalne pjene.

Jedan od glavnih problema prilikom zavarivanja metalnih pjena je urušavanje ćelijaste strukture. Do njega dolazi zbog prijelaza čvrste faze u tekuću nakon što je samo mjesto zavora izloženo toplini. Pri ohlađivanju tekuća faza prelazi u krutu koja više nije istih svojstava kao prethodna kruta metalna pjena. Zbog toga, pri zavarivanju metalnih pjena, unos topline treba biti kontroliran i što manji kako bi se, što je više moguće, zadržala kompaktna ćelijasta struktura, a zona staljivanja bila što uža. Još jedan od problema je vrlo tanki sloj  $Al_2O_3$  na površini koji ima više talište od aluminija. Zato se nakon uklanjanja oksida, zavarivanje obavlja u atmosferi zaštitnog plina kako se sloj oksida ne bi obnovio. Problem predstavlja i kora metalnih pjena koja je u velikoj mjeri neporozna, no često se u njoj nalaze veće ili manje pukotine. Zavarivanje dodatno otežava i različita debljina površinskog sloja [11].

Procesi koji omogućuju očuvanje specifičnih svojstava metalnih pjena su posebno važni. Lasersko i ultrazvučno zavarivanje su metode koje se vrlo često preporučaju za spajanje metalnih pjena. Posebno je pogodno lasersko zavarivanje koje je predstavljeno kao najbolja tehnika za spajanje aluminijskih pjena, zbog minimalnog unosa topline zbog čega je i moguće očuvanje ćelijaste strukture (slika 8). Nadalje, laser se također koristi za spajanje aluminijskih pjena s masivnim konstrukcijama [1].



**Slika 8.** Lasersko zavarivanje metalne pjene [11]

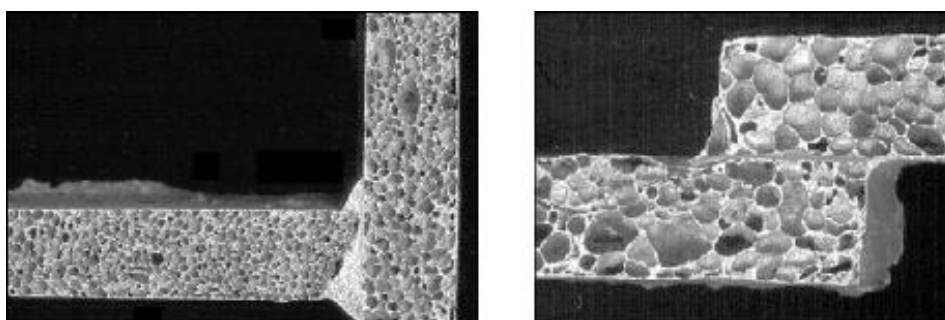
Aluminijske pjene mogu se zavarivati i postupcima TIG i MIG, osobito ako su aluminijske pjene ojačane mrežicom od nehrđajućeg čelika, no upotreba tih tehnologija ne jamči uspješno zavarivanje metalnih pjena niti dobra svojstva zavara. Zbog prevelikog unosa topline i široke zone utjecaja topline dolazi do taljenja stjenki ćelija i slijeganja taline što konačno dovodi do značajnog urušavanja ćelijaste strukture (slika 9).



**Slika 9.** Urušavanje ćelijaste strukture kao rezultat prekomjernog dovođenja topline TIG zavarivanjem [11]

Kao dodatni materijal za zavarivanje metalnih pjena može se koristiti prekursor u obliku šipke ili žice [11]. Pri unosu topline radi taljenja osnovnog materijala oblik prekursora se mijenja u metalnu pjenu i ispunjava prostor na mjestu spoja.

Na slici 10 Prikazani su primjeri zavarenih spojeva metalnih pjena



**Slika 10.** Primjeri zavarenih spojeva metalnih pjena [1]

Kao postupci za zavarivanje metalnih pjena mogu se koristiti:

- lasersko zavarivanje,
- zavarivanje trenjem rotirajućim trnom,
- ultrazvučno zavarivanje,
- difuzijsko zavarivanje,
- elektronski snop (premda do sada nisu provedena istraživanja) [11].

## 5. PRIMJENA METALNIH PJENA

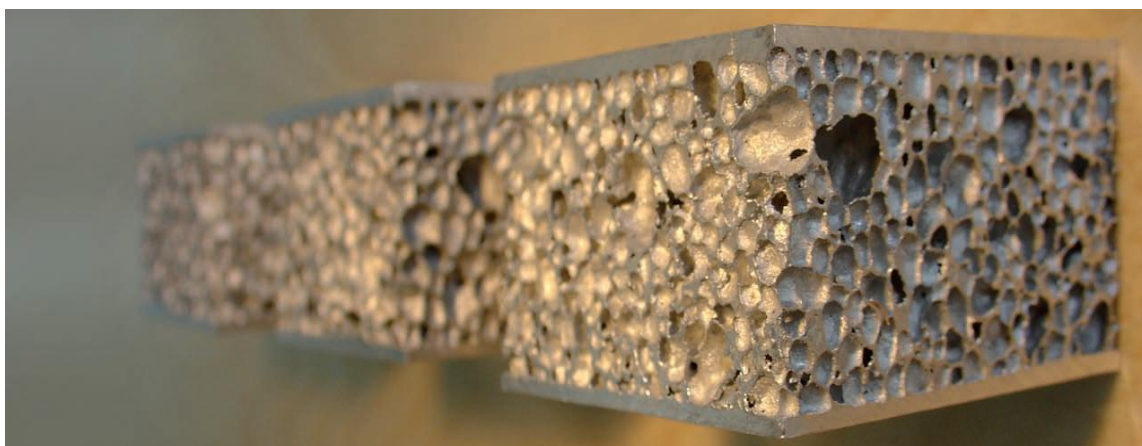
Primjena metalnih pjena proizlazi iz njihovih povoljnih svojstava u odnosu na ostale, konvencionalne materijale. Budući da su metalne pjene relativno novi oblik materijala, njihova primjena još uvijek nije u potpunosti raširena. Metalne pjene mogu uspješno zamijeniti druge ćelijaste materijale, npr. drvo i polimerne pjene. Loša strana metalnih pjena je njihova visoka cijena, no ona se neprestano smanjuje. Najraširenija upotreba metalnih pjena je u automobilskoj industriji. U tablici 4 navedena su neka područja najčešće primjene metalnih pjena.

**Tablica 4.** Moguće primjene metalnih pjena [10]

PODRUČJE PRIMJENE	OBRAZLOŽENJE
Lagane konstrukcije	Odličan omjer krutosti i težine pri savijanju
Jezgra sendvič konstrukcija	Niska gustoća i dobra smična i lomna čvrstoća
Prigušenje vibracija	Prigušenje vibracija je i do 10 puta bolje nego kod neporoznih metala
Apsorpcija zvuka	Metalne pjene s mrežastom strukturom
Apsorpcija energije	Vrlo dobra apsorpcija udarne energije pri sobnim i povišenim temperaturama
Zamjena za drvo	Lagane su, krute i mogu se spajati drvenim vijcima
Izmjenjivači topline, hladnjaci	Pjene s otvorenim ćelijama dobro provode toplinu zbog velike površine i vodljivosti stijenki
Vatrootpornost	Pjene sa zatvorenim ćelijama – stijenke prekrivene slojem oksida
Toplinska izolacija	Određene vrste pjena imaju niski koeficijent toplinske vodljivosti
Biokompatibilni umeci	Ćelijasta struktura biokompatibilnih titanovih pjena stimulira rast ćelije
Filtri	Mogućnost filtriranja plinova i tekućina
Elektromagnetska zaštita	Dobra električna vodljivost



U današnje vrijeme najčešći oblik metalnih pjena su sendvič-konstrukcije (slika 11 i slika 12). One imaju veliku sposobnost apsorpiranja energije udara, te su zbog toga pogodne za ugradnju u razne automobilske konstrukcije, ali se mogu upotrebljavati i u vojne svrhe pri izradi zaštitnih dijelova odjeće i vojnih vozila.



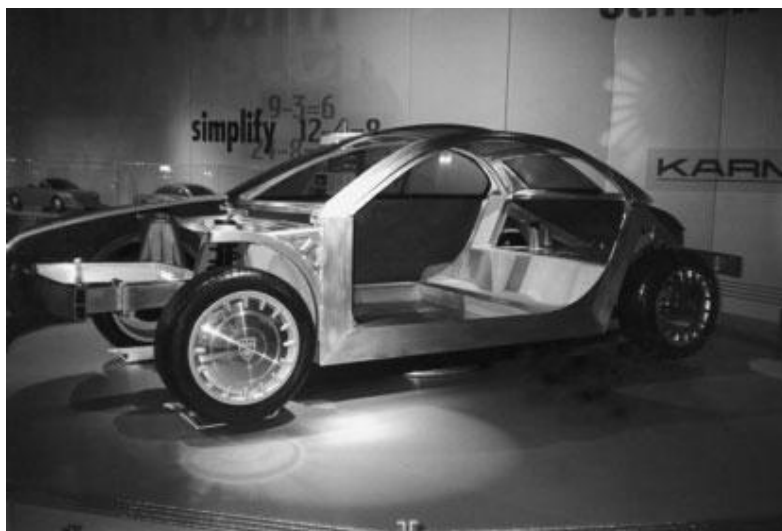
**Slika 11.** Sendvič konstrukcija s jezgrom od metalne pjene [14]



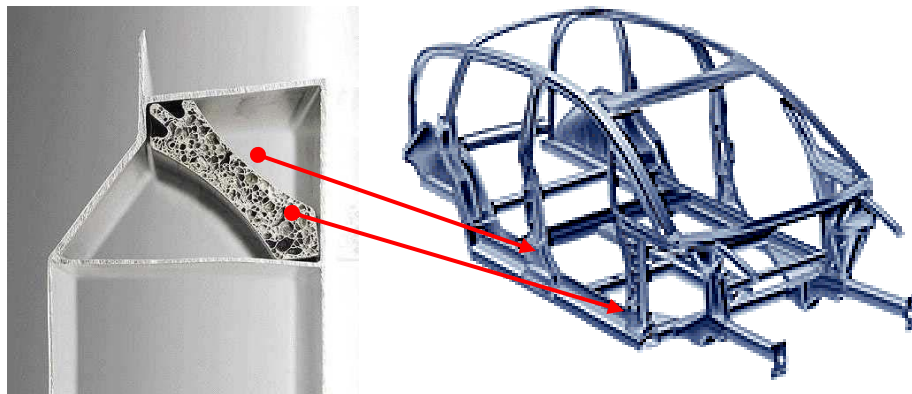
**Slika 12.** Primjeri sendvič konstrukcija napravljenih od metalne pjene [15]



Istraživanja su pokazala da najveće zanimanje za metalne pjene pokazuje industrija transportnih sredstava (slika 13 i slika 14).



**Slika 13.** Na sajmu automobila u Detroitu 1998. godine, prikazana je potencijalna primjena sendvič konstrukcija na automobilskim karoserijama [16]



**Slika 14.** Metalne pjene u autoindustriji [9]

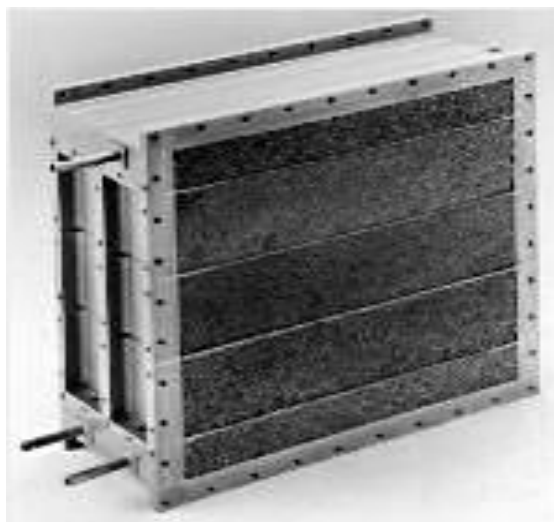
Metalne pjene se u autoindustriji uglavnom koriste kao jezgra sendvič-konstrukcija. One se koriste za izradu dijelova oplata i okvira. Time se masa automobila može smanjiti za 20% što predstavlja i značajne uštede u potrošnji goriva. Ako je poznato da metalne pjene imaju dobra toplinsko i zvučno-izolacijska svojstva te mogućnost prigušenja vibracija, jasno je da se one mogu primijeniti za razdvajanje kabine vozila od područja gdje je motor. Budući da aluminijske pjene imaju vrlo dobru sposobnost apsorpcije energije udara, od njih se mogu izrađivati i branici koji povećavaju sigurnost putnika pri udarcima [1].

Velik omjer površina/volumen metalnih pjena također omogućava izradu uređaja za kontrolu protoka fluida kao što su npr. difuzori plina, mjerači razine tekućine (slika 15) i sl. Iako se za ovu namjenu koriste metalne pjene sa zatvorenim ćelijama potrebno je na takve predmete još dodatno nanijeti neke prevlake. Naime metalne pjene su porozne (sadrže mikropukotine), te unatoč tome što su ćelije zatvorene, nakon dužeg izlaganja vodi, ona bi nakon nekog vremena prodrila unutar same pjene.



**Slika 15.** Plovak izrađen od metalne pjene [9]

Toplinska svojstva metalnih pjena najviše ovise o njihovoj građi. Ako pjena ima otvorene ćelije, ona će dobro provoditi toplinu, a ako su ćelije zatvorene, ona je vrlo dobar toplinski izolator. Pjene s otvorenim ćelijama, zbog svoje velike površine i dobre toplinske vodljivosti stjenki, dobro provode toplinu i mogu se primijeniti za izradu izmjenjivača topline, hladnjaka itd (slika 16) [1].



**Slika 16.** Izmjenjivač topline napravljen od DUOCEL Al pjene [1]

Metalne pjene koriste se i u graditeljstvu gdje do izražaja dolazi njihova vrlo dobra mogućnost upijanja zvuka. Istraživanja su pokazala kako se bušenjem provrta upijanje zvuka metalnih pjena dovodi na razinu staklene vune, materijala koji se uglavnom upotrebljava u te svrhe. One također imaju bolja mehanička i toplinska svojstva, a njihova krutost osigurava lakšu montažu. Pod utjecajem vatre staklena vuna oslobađa otrovne plinove, dok su metalne pjene vatrootporne [1].

Od tzv. aluminijskih spužvi izrađuju se također razni oblici prigušivača zvuka kao što je i prikazano na slici 17.



**Slika 17.** Prigušivači zvuka od aluminijskih pjena [1]

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

### 6.1. Izrada aluminijskih pjena

U prvom dijelu eksperimentalnog rada bit će opisana izrada aluminijskih pjena. Metalne pjene moguće je dobiti različitim načinima proizvodnje, o čemu je već pisano u poglavlju „Postupci proizvodnje metalnih pjena“. Jedan od češćih načina proizvodnje metalnih pjena je taj da se pjena oblikuje u rastaljenoj fazi. Mješavina rastaljenog praha i agensa ( $\text{TiH}_2$ ) zagrijava se, pri čemu se oslobađaju mjehurići u taljevini i stvara se pjena. Time se može utjecati na oblik, veličinu i stupanj otvorenosti ćelija te na relativnu gustoću ( $\rho/\rho_s$ ) [1].

$\rho$  – gustoće metalne pjene

$\rho_s$  – gustoća neporoznog materijala

Ovim postupkom proizvedena je i legura AlSi10 koja će se koristiti za izradu uzoraka u ovom radu.

Tehnologija korištena za izradu uzoraka je "Plinom oslobođene čestice rastvorene u polukrutoj fazi" koja je detaljno opisana u poglavlju 2.1. Za izradu pjena korištena je elektrootporna peć, snage 7,5 kW, koja se nalazi u "Laboratoriju za nemetale", FSB (slika 18)



**Slika 18.** Elektrootporna peć za proizvodnju metalnih pjena

Za potrebe ovog rada odlučeno je napraviti ploče dimenzija 220x253x15mm. Za izradu tih ploča koristili smo čelični kalup (slika 19) sa kalupnom šupljinom čije dimenzije odgovaraju dimenzijama traženih ploča. Prvo je kalup trebalo dobro očistiti od ostataka prethodne proizvodnje metalnih pjena, te odmastiti benzinom.



**Slika 19.** Kalup (220x253x15 mm)

Nakon pripreme kalupa, potrebno je bilo pripremiti prekursor, odnosno izrezati ga na potrebnu dužinu da stane u kalup (slika 20). Za izradu ploča u ovom radu, upotrijebiti će se prekursor oznake ALULIGHT AlSi10 TiH<sub>2</sub> - 0,8.



**Slika 20.** Prekursor od legure AlSi10

Nakon pripreme kalupa i izrezivanja prekursora na potrebnu dužinu važno je odrediti količinu prekursora koja se stavlja u kalup. U ovom radu potrebno je proizvesti aluminijske pjene različitih poroznosti (gustoća). Poroznost ovisi o količini prekursora (manje prekursora, veća poroznost, više prekursora, manja poroznost). Zadatak je proizvesti ploče gustoća 40% i 60% iz kojih će se kasnije izrezati uzorci. U nastavku je prikazano određivanje količine prekursora za različite gustoće pjena.

Iz dimenzija kalupa određen je njegov volumen, koji pomnožen sa gustoćom materijala daje masu materijala gustoće 100%.

Volumen ploče traženih dimenzija bez poroznosti računati će se prema izrazu:

$$V = l \cdot g \cdot h \quad (1)$$

Gdje je:

- $l$  – duljina kalupne šupljine = 220 mm
- $g$  – širina kalupne šupljine = 253 mm
- $h$  – visina kalupne šupljine = 15 mm

Prema izrazu 1 slijedi da je volumen kalupne šupljine, odnosno volumen ploče metalne pjene:

$$V = 220 \times 253 \times 15 \text{ mm} = 834900 \text{ mm}^3 = 0,0008349 \text{ m}^3$$

Gustoća legure AlSi10 iznosi približno  $\rho \approx 2500 \text{ kg/m}^3$ . Formula iz koje se računa masa uz poznatu gustoću i volumen glasi:

$$m = \rho \cdot V \quad (2)$$

Uvrštavanjem poznate gustoće i volumena u izraz 2 može se izračunati masa ploče bez poroznosti (100% gustoća):

$$m = 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0008349 \text{ m}^3 = 2,08725 \text{ kg}$$

Za izradu neporoznog materijala, ovih dimenzija, potrebno je 2,08725 kg prekursora. Ako se žele dobiti pjene različitih poroznosti, masa prekursora mora se pomnožiti sa odgovarajućim koeficijentom, ovisno o iznosu gustoće koji se traži.



Masa ploče od aluminijske pjene traženih dimenzija 220x253x15 mm sa 40% gustoće iznositi će:

$$m = 2,08725 \cdot 0,4 = 0,8349 \text{ kg}$$

Dok će masa ploče sa 60 % gustoće iznositi:

$$m = 2,08725 \cdot 0,6 = 1,25235 \text{ kg}$$

Iz toga slijedi da je za aluminijsku pjenu gustoće 40% potrebno 0,8349 kg prekursora, a za pjenu gustoće 60% 1,25235 kg prekursora.

Nakon što je izračunata, na vagi je i izmjerena tražena masa prekursora (slika 21).



**Slika 21.** Mjerenje mase prekursora

Nakon što je određena potrebna količina, prekursor se stavlja u kalup (slika 22). Kalup se zatim zatvara i steže vijcima da ne dođe do istjecanja materijala prilikom upijavanja (slika 23).



**Slika 22.** Punjenje kalupa prekursorom



**Slika 23.** Zatvaranje kalupa i stezanje vijcima



Tako pripremljen kalup stavlja se u prethodno zagrijanu peć (slika 24), gdje se zagrije na temperaturu koja je empirijski određena ( $\approx 760^{\circ}\text{C}$ ). Stavljanje kalupa u peć treba obaviti što je moguće brže, da pad temperature u peći bude minimalan, odnosno da se ne gubi toplina.



**Slika 24.** Stavljanje kalupa u peć

Nakon što je kalup točno pozicioniran (slika 25) slijedi zatvaranje peći i počinje proces zagrijavanja kalupa.



**Slika 25.** Kalup u peći

Izradak je gotov kad se na otvoru za izlaz plinova pojavi prva kuglica taljevine, nakon čega slijedi vađenje kalupa iz peći (slika 26) i intenzivno hlađenje, čime se pjena stabilizira.



**Slika 26.** Kalup nakon vađenja iz peći

Trajanje samog procesa ovisi o temperaturi i veličini prekursora, a kreće se od nekoliko sekundi do nekoliko minuta [1]. Tijekom zagrijavanja kalup je bio u peći 25 minuta. Proizvod poprima oblik kalupa, ima relativnu gustoću od 0,08 naviše i zatvorene ćelije promjera 1 do 5 mm [1]. Nakon što se kalup ohladio, otvara se, te se vadi gotovi proizvod van (slika 27)



**Slika 27.** Otvaranje kalupa nakon završetka procesa

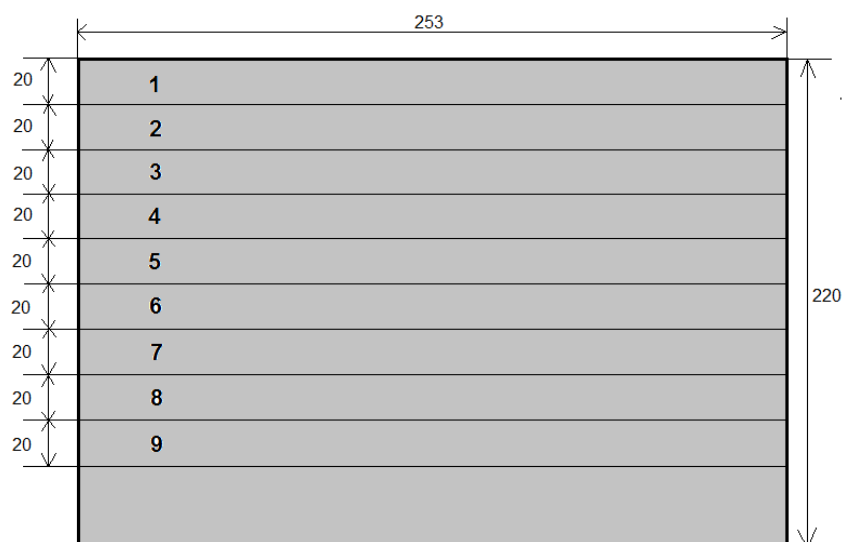
U konačnici, dobivene su dvije ploče od aluminijskih pjena (slika 28), različite gustoće (40% i 60%). Postupak proizvodnje bio je isti za obje ploče, jedino je razlika u masi prekursora koji se stavljao u kalup.



**Slika 28.** Ploče od aluminijskih pjena različite gustoće

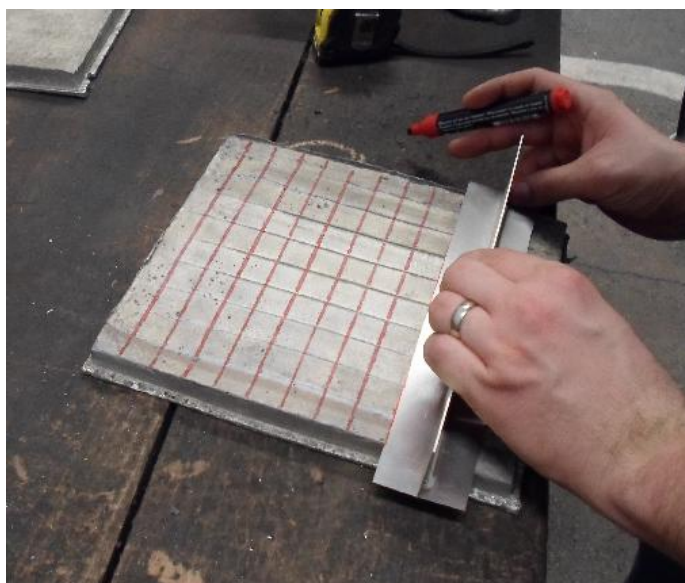
## 6.2. Izrezivanje i označavanje uzoraka

Nakon što su ploče od aluminijskih pjena napravljene iz svake od njih je bilo potrebno izrezati ispitne uzorke. Ispitni uzorci su rezani po shemi prikazanoj na slici 29. Iz svake ploče izrezano je 9 jednakih uzoraka dimenzija 253x20x15mm. Uzorci nisu rezani prema standardnoj normi iz razloga što ne ispitujemo materijale međusobno, već nas zanima usporedba mehaničkih svojstava različitih vrsta spojeva.



**Slika 29.** Shematski prikaz izrezivanja ispitnih uzoraka iz ploče

Prije samog izrezivanja potrebno je bilo na ploči iscrtati linije po kojima treba rezati (slika 30)



**Slika 30.** Iscrtavanje uzoraka na ploči od aluminijske pjene

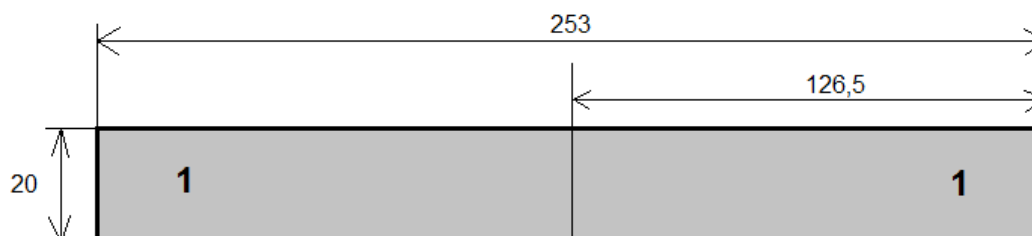


Nakon iscrtavanja uzoraka, uslijedilo je njihovo izrezivanje na tračnoj pili (slika 31)



**Slika 31.** Izrezivanje uzoraka iz aluminijskih ploča

Po završetku izrezivanja uzoraka potrebno je bilo prerezati po pola uzorke koji će se lijepiti i zavarivati. Uzorci su rezani po shemi na slici 32, a rezanje je obavljeno ručnom pilom (slika 33) kako bi se rezna površina što manje zapunila česticama rezanja. Tri uzorka od svake gustoće nisu prerezani po pola, već su ostavljeni kao homogeni ispitni uzorci.



**Slika 32.** Shematski prikaz rezanja uzorka za lijepljenje i zavarivanje



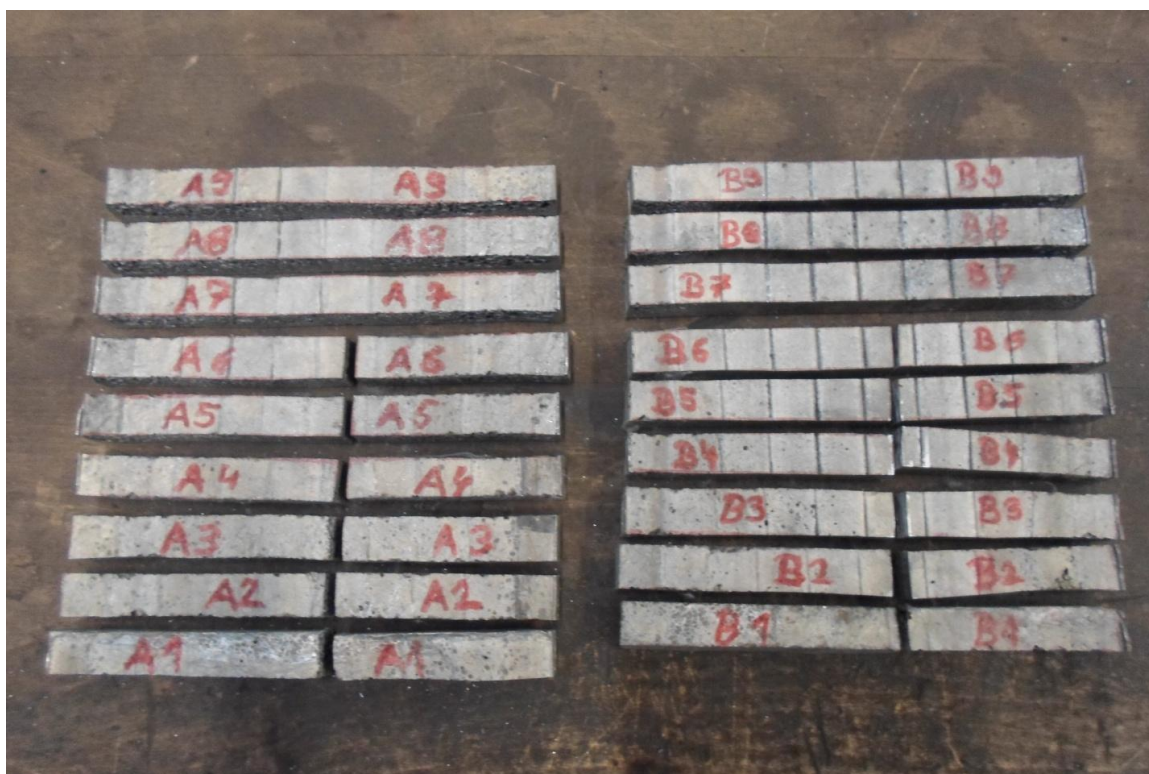
**Slika 33.** Rezanje uzoraka ručnom pilom

Nakon što su svi uzorci izrezani, potrebno ih je bilo i pravilno označiti, radi lakšeg rukovanja u daljnjem radu. Svi uzorci izrezani iz ploče gustoće 40% označeni su slovom "A", dok su uzorci iz ploče gustoće 60% označeni slovom "B". Uzorci i jedne i druge ploče označeni su brojevima od 1 do 9 (A1, A2,...; B1, B2,...). Uzorci 1, 2 i 3 korišteni su za lijepljenje, uzorci 4, 5 i 6 za zavarivanje, dok su uzorci 7, 8 i 9 ostavljeni kao cijeli homogeni uzorci. U tablici 5 prikazane su oznake uzoraka koje će se koristiti dalje u radu.

**Tablica 5.** Oznake izrađenih uzoraka

Materijal	Gustoća	Vrsta uzoraka	Oznaka uzorka
AlSi10	40%	Lijepljeni uzorci	A1
			A2
			A3
		Zavareni uzorci	A4
			A5
			A6
		Homogeni uzorci	A7
			A8
			A9
	60%	Lijepljeni uzorci	B1
			B2
			B3
		Zavareni uzorci	B4
			B5
			B6
		Homogeni uzorci	B7
			B8
			B9

Na slici 34 prikazani su pripremljeni, te pravilno označeni ispitni uzorci.



**Slika 34.** Pripremljeni i pravilno označeni ispitni uzorci

### 6.3. Spajanje ispitnih uzoraka

Nakon što su pripremljeni svi uzorci, slijedi spajanje pojedinih uzoraka. Već je ranije spomenuto da će se uzorci 1, 2 i 3 lijepiti, uzorci 4, 5 i 6 zavarivati dok će se uzorci 7, 8 i 9 ostaviti netaknuti kao homogeni ispitni uzorci.

#### 6.3.1. Lijepljenje ispitnih uzoraka

Za postupak lijepljenja aluminijskih pjena odabrani su ispitni uzorci 1, 2 i 3 od svake gustoće (slika 35).



Slika 35. Ispitni uzorci za lijepljenje



Mehanizam lijepljenja djeluje na načelu dviju vrsta privlačnih sila koje se javljaju u lijepljenom spoju, a to su:

- adhezijske privlačne sile,
- kohezijske privlačne sile.

Adhezijske privlačne sile omogućuju dobro prijanjanje ljepila na površine koje se lijepe. To je stanje u kojem se dvije površine drže zajedno međusobnim djelovanjem privlačnih sila zbog interakcije molekula, atoma i iona na obje površine. Može uključivati kemijsko ili fizikalno povezivanje dviju površina. Pri tome se kemijsko povezivanje sastoji od izravnog povezivanja molekula dvaju materijala kovalentnim ili ionskim vezama, a fizikalno povezivanje može rezultirati mehaničkim sidrenjem, fizikalnom apsorpcijom između molekula ljepila i površine koja se lijepi ili penetracijom molekula ljepila u površinu zbog mehanizma difuzije. Kod materijala visoke gustoće, kao što su metal i keramika, zbog nemogućnosti difuzije molekula ljepila u površinu materijala za lijepljenje, dolazi do adsorpcije molekula ljepila na tu površinu. Jednostavno rečeno, molekule ljepila bivaju privučene na površinu za lijepljenje. Ovaj proces je u praksi otežan zbog prisutnosti različitih oksida, masnoće i prljavštine na površini [18].

Kohezijske privlačne sile omogućuju postizanje dovoljne čvrstoće ljepila u očvrstnutom stanju. To je unutrašnja čvrstoća ljepila, odnosno djelovanje privlačnih sila istovrsnih atoma i molekula ljepila, koje određuju čvrstoću ljepila i samog lijepljenog spoja [18].

Prije svakog postupka lijepljenja potrebno je izvršiti pripremu za lijepljenje. Najvažnija je priprema površine u svrhu povećanja prijanjajućih sila između površine zalijepljenih dijelova i sloja ljepila. Kako bi uklonili prljavštinu, a time i povećali djelotvornu površinu na ispitnim uzorcima, provedeno je čišćenje površina za lijepljenje i to brušenjem. Također je provedeno i odmašćivanje površina za lijepljenje pomoću sredstva za čišćenje.

Nakon što su površine za lijepljenje pripremljene (očišćene i odmašćene) potrebno je izabrati odgovarajuće ljepilo za lijepljenje. U ovom radu za lijepljenje ispitnih uzoraka korišteno je epoksidno ljepilo DP190 (slika 36) tvrtke 3M Scotch-Weld.



**Slika 36.** Ljepilo DP190

Ljepilo DP190 je dvokomponentno epoksidno ljepilo sive boje. Posjeduje visoku smičnu čvrstoću. Komponente se miješaju u omjeru 1:1. Vrijeme skrućivanja je 90 minuta, a ako se primjenjuje pri višim temperaturama to vrijeme se smanjuje [19]. Ovo ljepilo se primjenjuje za spajanje čelika, aluminija, polimera i stakla, pa je pogodno i za aluminijske metalne pjene. Neka osnovna svojstva ovog lijepila prikazana su u tablici 6.

**Tablica 6.** Svojstva lijepila DP190 [19]

Boja	Siva
Vrijeme skrućivanja	90 min
Vrijeme potpunog skrućivanja	7 dana
Istezanje	30 %
Vlačna čvrstoća	24 N/mm <sup>2</sup>
Temperatura skladištenja	15-27°C

Radi lakšeg rukovanja ljepilom korišten je pištolj za ljepilo tvrtke Loctite prikazan na slici 37.



**Slika 37.** Pištolj za ljepilo

Nakon što je ljepilo istisnuto na komadić lima jasno se mogu raspoznati dvije različite komponente (slika 38).



**Slika 38.** Prikaz istisnutog ljepila

Kod dvokomponentnih ljepila najvažnije je da su komponente pri uporabi ljepila ravnomjerno i homogeno raspoređene, stoga ih je potrebno dobro izmiješati. Prilikom miješanja ljepila potrebno je postići dva cilja. Jedan cilj je promjena fizikalnih svojstava ljepila, što se postiže dodavanjem punila i/ili otapala a drugi je uvođenje kemijske reakcije do očvršćivanja [18]. Kako bi se komponente kod ljepila DP190 što bolje izmiješale potrebno je mješati ljepilo oko 15 sekundi dok ne postane jednobožno (slika 39).



**Slika 39.** Miješanje ljepila

Nakon što je ljepilo dobro izmiješano uslijedilo je nanošenje istog na uzorke. Ljepilo se može nanositi na različite načine koji se biraju prema geometriji dijelova za lijepljenje, viskoznosti ljepila i stupnju automatizacije proizvodnog procesa. Načini na koje se ljepilo može nanositi su: ručno nanošenje, prskanje, umakanje, nanošenje valjkom, lijevanje, nanošenje kistom, nanošenje lopaticom, mazanje, pečaćenje, topljenje, polaganje i umetanje [18]. Na slici 40 prikazano je ručno nanošenje ljepila na uzorke, a na slici 41 prikazano je ljepilo na ćelijastoj površini koja se lijepi.



**Slika 40.** Nanošenje ljepila na ispitne uzorke



**Slika 41.** Ljepilo na ćelijastoj površini koja se lijepi



Kad je ljepilo naneseo na obje površine koje se lijepe, uzorci su međusobno spojeni. Prilikom sastavljanja spoja, spoj se mora tlačiti određenim tlakom sve dok slijepljeni dio u potpunosti ne očvrstne. Stoga su uzorci nakon spajanja učvršćeni stegama (slika 42) kako bi se osigurala potrebna sila u spoju, te spriječilo pomicanje, odnosno razdvajanje uzoraka. Nakon što je sve učvršćeno i osigurano, ispitni uzorci su ostavljeni sve dok nije došlo do potpunog skrućivanja ljepila.



**Slika 42.** Stezanje zalijepljenih ispitnih uzoraka

Nakon što je ljepilo u potpunosti očvrstnulo, stege su maknute i zalijepljeni ispitni uzorci bili su spremni za ispitivanje mehaničkih svojstava (slika 43).



**Slika 43.** Zalijepljeni ispitni uzorci

Na slici 44 prikazan je lijepljeni spoj nakon potpunog skrućivanja ljepila. Jasno se može vidjeti sloj ljepila između dva ispitna uzorka. Također se može uočiti kako je ljepilo prodrlo u pore aluminijske metalne pjene.



**Slika 44.** Prikaz lijepljenog spoja

### 6.3.2. Zavarivanje ispitnih uzoraka

Za postupak zavarivanja odabrani su ispitni uzorci 4, 5 i 6 od svake gustoće (slika 45)

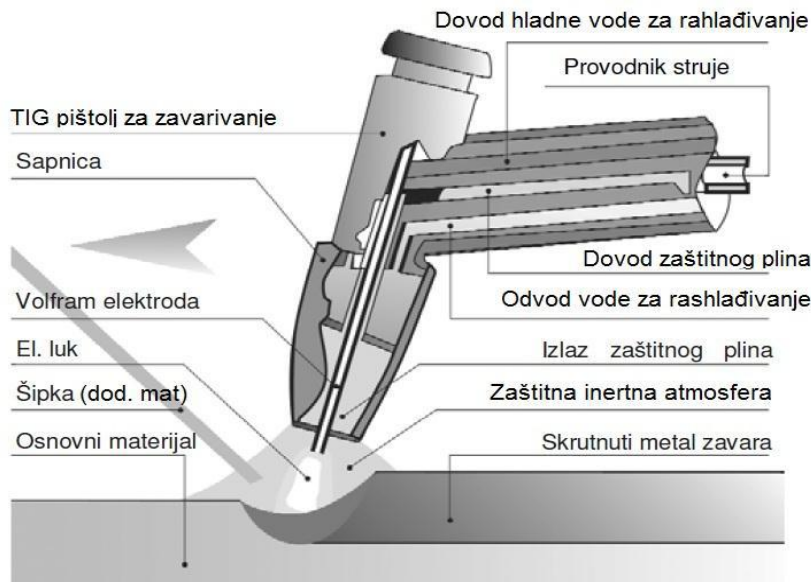


**Slika 45.** Ispitni uzorci za zavarivanje

Kao što je već ranije spomenuto u poglavlju 4.4 najpogodnija metoda za spajanje metalnih pjena je lasersko zavarivanje. U ovom radu nije bilo mogućnosti primijeniti lasersko zavarivanje, pa je odlučeno da će se ispitni uzorci zavariti ručnim TIG postupkom.

TIG tehnologija zavarivanja, poznata i pod imenom GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ili WIG (Wolfram Inert Gas), je elektrolučni postupak zavarivanja gdje se toplinom oslobođenom u električnom luku, koji se uspostavlja između elektrode načinjene iz volframa i radnog komada, tali osnovni, a po potrebi i dodatni materijal [20]. Na slici 46 prikazana je shema TIG postupka.





**Slika 46.** Shema TIG postupka [21]

Energija potrebna za taljenje metala dovodi se pomoću električnog luka koji se održava između volframove elektrode i radnog komada pod zaštitom inertnog plina. Dodatni materijal je obično u obliku šipke, za ručne ili u obliku namotane žice, za automatizirane postupke. Inertni plin, koji štiti ZUT od atmosferskih utjecaja, omogućuje jako stabilan električni luk. Ovisno o osnovnom materijalu zaštitni plin je argon (Ar), helij (He), te njihove kombinacije s vodikom (H) i dušikom (N) [22].

Prije samog zavarivanja trebalo je odrediti sve potrebne parametre kako bi se dobile što bolje karakteristike zavarenog spoja. Korišteni parametri prikazani su u tablici 7.

**Tablica 7.** Parametri TIG zavarivanja

Jakost struje [A]	85 (za uzorke gustoće 40%) 100 (za uzorke gustoće 60%)
Napon [V]	10
Dodatni materijal	AlSi5
Debljina žice dodatnog materijala [mm]	2,4
Zaštitni plin	Ar
Promjer elektrode [mm]	2,5
Priprema spoja	Sučeljeni spoj

Postupak TIG zavarivanja ispitnih uzoraka proveden je na uređaju KJELLBERG TINY 170 AC/DC prikazanom na slici 47.



**Slika 47.** Uređaj za TIG zavarivanje

Zavarivanje je izvedeno u sučeljenom spoju sa po jednim prolazom sa gornje i donje strane spoja. Sam postupak zavarivanja trebalo je provesti vrlo pažljivo i vrlo kontrolirano. Razlog tome je taj što kod zavarivanja metalnih pjena glavni problem predstavlja čelijasta struktura, te je zbog toga potrebno kontrolirano unositi toplinu u materijal. Naime, kad bi se prilikom zavarivanja pojavila velika pora, trebalo je prekinuti dotok energije i zapuniti poru rastaljenim dodatnim materijalom. Jedino se na taj način mogao postići kvalitetan zavar između uzoraka aluminijske pjene. Na slici 48 prikazani su uzorci nakon provedenog postupka zavarivanja



**Slika 48.** Zavareni ispitni uzorci

Na slici 49 prikazan je zavar između uzoraka aluminijske metalne pjene. Možemo vidjeti kako je talina prodrla u materijal te je njezinim skrućivanjem došlo do povezivanja uzoraka.



**Slika 49.** Prikaz zavarenog spoja

### 6.3.3. Homogeni ispitni uzorci

Ispitni uzorci 7, 8 i 9 nisu rezani po pola, pa spajani, već su ostavljeni kao cijeli uzorci. Oni predstavljaju homogeni materijal, te će se na njima, kao takvima, provoditi ispitivanje mehaničkih svojstava. Ti će rezultati ispitivanja pokazati odnos mehaničkih svojstava homogenog uzorka i uzoraka spojenih lijepljenjem i zavarivanjem. Homogeni ispitni uzorci su prikazani na slici 50.



**Slika 50.** Homogeni ispitni uzorci



#### 6.4. Ispitivanje mehaničkih svojstava

Na osnovi veličine mehaničkih svojstava materijala dimenzioniraju se dijelovi strojeva i uređaja. S pomoću mehaničkih svojstava može se objektivno ocijeniti kvaliteta materijala u prijamnoj kontroli poluproizvoda, te u završnoj kontroli proizvoda. Na osnovi nekih mehaničkih svojstava materijala utvrđuju se tehnološki parametri u proizvodnji. Mehanička svojstva materijala su, kao i sva ostala svojstva, posljedica strukturnog stanja materijala. Poznavanjem korelacije „strukturno stanje – mehanička svojstva“ bilo bi teoretski moguće proračunati mehanička svojstva koristeći strukturne i mikrostrukturne parametre [23]. Budući da su u realnim tvarima prisutne strukturne i mikrostrukturne nepravilnosti koje nije moguće uočiti i obuhvatiti proračunom, mehanička svojstva realnih materijala mogu se utvrditi samo pokusom.

Puno više podataka o svojstvima samog spoja dobilo bi se da je na ispitnim uzorcima provedeno statičko vlačno ispitivanje na kidalici. Međutim, problem kod statičkog vlačnog ispitivanja je postavljanje uzoraka u prihvatne čeljusti kidalice, jer bi prilikom pritezanja, zbog ćelijaste strukture, došlo do razaranja materijala. Stoga je odlučeno da će se provesti ispitivanje udarnog rada loma, odnosno žilavosti, na Charpy-evom batu. Ispitivanja žilavosti napravljena su u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava.

##### 6.4.1. Ispitivanje udarnog rada loma

Ispitivanje udarnog rada loma provedeno je na Charpy-evom batu ANYAGVIZSGALO KESZULEKEK GYARA BUDAPEST (slika 51). Tip Charpy-evog bata je UT30, a serijski broj 71007.



**Slika 51.** Charpy-ev bat

Ispitivanje nije provedeno prema normi iz razloga što bi bilo vrlo teško napraviti tako male uzorke od metalne pjene, te se na tako malim uzorcima ne bi dobile neke velike razlike u rezultatima. U ovom radu uspoređuju se svojstva spoja, a ne materijala, tako da dimenzija epruvete ne treba biti po normi. Ispitane su po tri ispitne epruvete od svakog uzorka, te je na temelju toga izračunata aritmetička sredina rezultata uz podatak o standardnoj devijaciji  $S$ . Standardna devijacija označava mjeru rasipanja podataka. Ispitivanje udarnog rada loma provedeno je u području 0 do 150 J, iz razloga što se radi o vrlo mekanom materijalu, te su dobivene vrijednosti jako male. Razmak među osloncima je 58 mm.

Prilikom ispitivanja uzorak epruvete se stavlja na oslonce Charpy-evog bata, te se bat slobodnim padom spušta sa određene visine i lomi je. Nakon loma epruvete, na skali uređaja se očitava energija, izražena u Joulima [J] koja je potrebna za lom epruvete.

#### 6.4.1.1. Ispitivanje udarnog rada loma na lijepljenim uzorcima

Na slici 52 prikazano je postavljanje lijepljenog ispitnog uzorka na oslonce Charpy-evog bata, a na slici 53 prikazani su lijepljeni ispitni uzorci nakon loma.



**Slika 52.** Postavljanje lijepljenih ispitnih uzorka na oslonce Charpy-evog bata

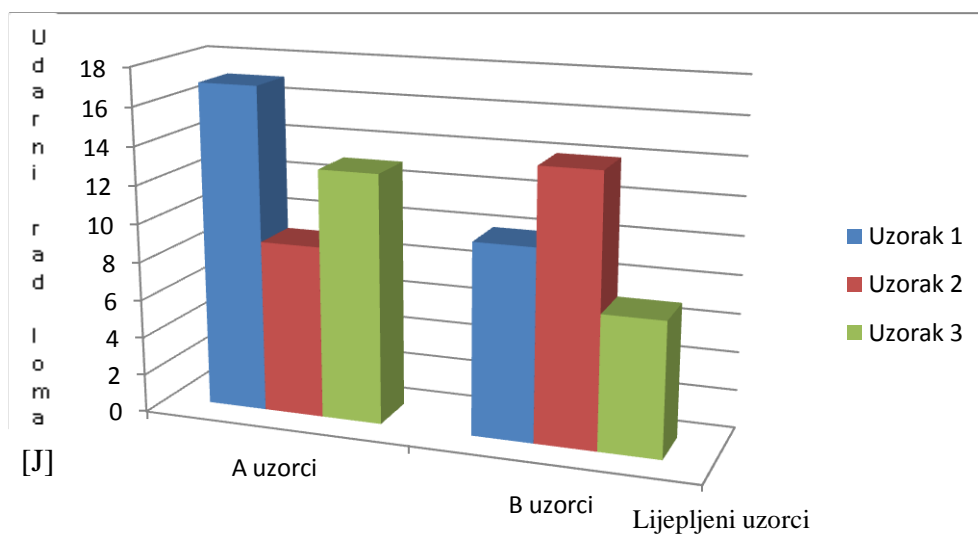


**Slika 53.** Lijepljeni ispitni uzorci nakon loma

U tablici 8 navedeni su rezultati mjerenja udarnog rada loma. Iz dobivenih rezultata izračunata je aritmetička sredina, odnosno srednja vrijednost od tri mjerenja, te standardna devijacija  $S$ , koja pokazuje koliko je rasipanje podataka. Također je dan i dijagramski prikaz rezultata na slici 54.

**Tablica 8.** Rezultati mjerenja udarnog rada loma lijepljenih uzoraka

Ispitni uzorak	Udarni rad loma [J]
A1	17
A2	9
A3	13
$\bar{x}$	13
$S$	3,26
B1	10
B2	14
B3	7
$\bar{x}$	10,33
$S$	2,86



**Slika 54.** Prikaz vrijednosti udarnog rada loma lijepljenih uzoraka u Joulima [J]

Iz dobivenih podataka uočljivo je da nema neke značajne razlike u rezultatima udarnog rada loma lijepljenog spoja kod ispitnih uzoraka različitih gustoća. Međutim, ipak se može zaključiti da lijepljeni spojevi kod ispitnih uzoraka manje gustoće (A-uzoraka) postižu nešto veće vrijednosti udarnog rada loma u odnosu na one kod uzoraka veće gustoće (B-uzoraka). Razlog tome je taj, što su uzorci manje gustoće porozniji, pa na lijepljenoj površini više ljepila uđe u pore i na taj način omogućava čvršći, odnosno žilaviji spoj. Iz toga se može zaključiti da su za lijepljenje prikladnije aluminijske pjene manje gustoće. Također, kod uzoraka veće gustoće došlo je do loma na samom spoju zbog male količine ljepila na lijepljenim površinama, dok se kod uzoraka manje gustoće lom dogodio pored lijepljenog spoja (slika 55), što dokazuje da je lijepljeni spoj čvršći od same metalne pjene.



**Slika 55.** Prikaz lijepljenog spoja nakon loma



#### 6.4.1.2. Ispitivanje udarnog rada loma na zavarenim uzorcima

Na slici 56 prikazano je postavljanje zavarenih ispitnih uzorka na oslonce Charpy-evog bata, dok su na slici 57 prikazani isti ti uzorci nakon loma.



**Slika 56.** Postavljanje zavarenog ispitnog uzorka na oslonce Charpy-evog bata

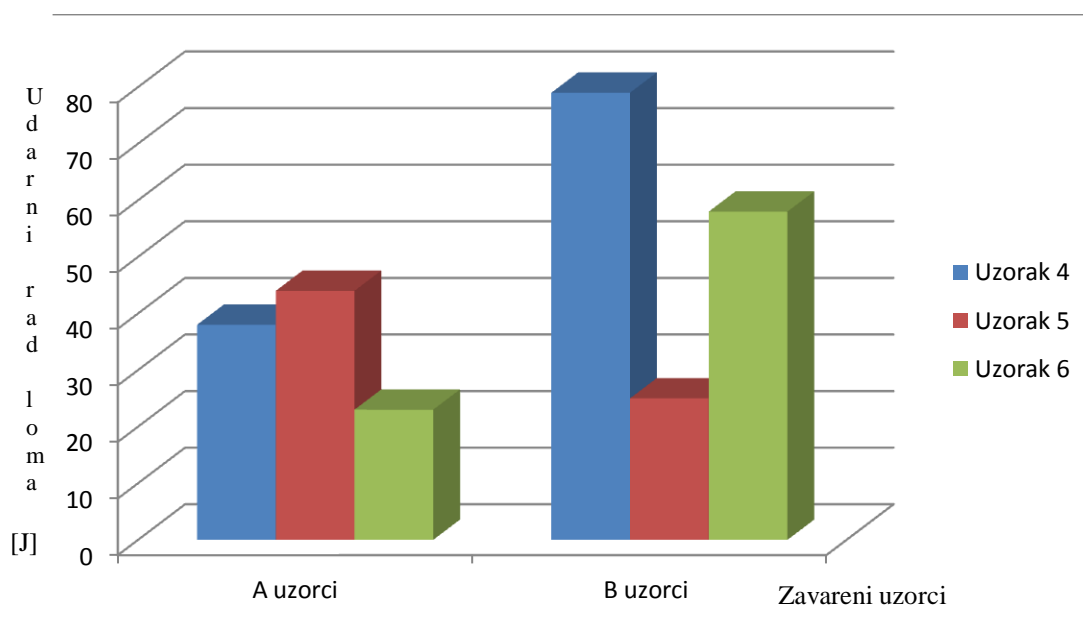


**Slika 57.** Zavareni ispitni uzorci nakon loma

U tablici 9 prikazani su rezultati mjerenja udarnog rada loma zavarenih uzoraka zajedno s pripadajućom aritmetičkom sredinom i standardnom devijacijom S. Rezultati su prikazani i dijagramski na slici 58.

**Tablica 9.** Rezultati mjerenja udarnog rada loma zavarenih uzoraka

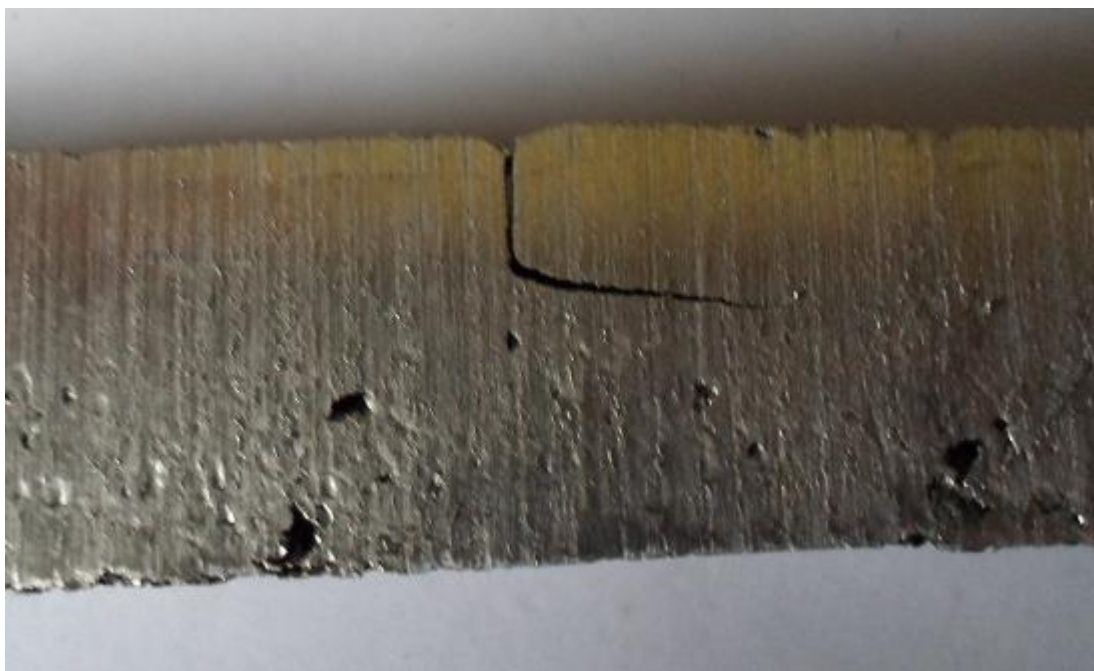
Ispitni uzorak	Udarni rad loma [J]
A4	38
A5	44
A6	23
$\bar{x}$	35
S	8,83
B4	79
B5	25
B6	58
$\bar{x}$	54
S	22,22



**Slika 58.** Prikaz vrijednosti udarnog rada loma zavarenih uzoraka u Joulima [J]

Iz prikazanih rezultata vidljivo je da se kod zavarenih uzoraka veće gustoće (B uzoraka) postižu puno veće vrijednosti udarnog rada loma samog spoja u odnosu na uzorke manje gustoće (A uzorke). Razlog tome je taj što ispitni uzorci veće gustoće sadrže više materijala pa lakše dolazi do njihova međusobnog povezivanja. Također, uzorci veće gustoće imaju deblju koru na površini što olakšava zavarivanje. Ispitni uzorci manje gustoće sadrže velik udio pora, te je zavarivanje otežano. Zbog velike količine pora dolazi do urušavanja ćelijaste strukture, te promjene svojstava samog spoja u odnosu na svojstva aluminijske pjene koja se spaja. Iz svega navedenog može se zaključiti da su za spajanje zavarivanjem prikladnije aluminijske pjene veće gustoće, odnosno što manjeg poroziteta.

Kod B ispitnih uzoraka može se uočiti da jedan rezultat znatno odstupa od ostalih vrijednosti. Naime, udarni rad loma zavarenog spoja ispitnog uzorka B5 je puno manji od ostala dva uzorka. Takvo odstupanje vrijednosti je posljedica postojanja pukotine na ispitnom uzorku u blizini samog spoja. Pukotina je najvjerojatnije nastala prilikom procesa proizvodnje ili prilikom zavarivanja zbog visokih toplinskih naprezanja, te je utjecala na rezultat ispitivanja. Postojanje jedne takve pukotine na uzorku može se vidjeti na slici 59.



**Slika 59.** Pukotina na ispitnom uzorku

Kod svih zavarenih uzoraka može se uočiti da do loma nije došlo na mjestu zavora, već pored njega. To dokazuje da je sami zavareni spoj čvršći od aluminijske pjene. Ako se aluminijske pjene zavaruju, vrlo je vjerojatno da će uslijed prevelikog opterećenja do loma doći pokraj zavarenog spoja. Prikaz loma pored zavarenog spoja može se vidjeti na slici 60.



**Slika 60.** Prikaz zavarenog spoja nakon loma



#### 6.4.1.3. Ispitivanje udarnog rada loma na homogenim uzorcima

Na slici 61 prikazani su homogeni ispitni uzorci postavljeni na oslonce Charpy-evog bata, dok su na slici 62 prikazani homogeni ispitni uzorci nakon loma.



**Slika 61.** Postavljanje homogenog ispitnog uzorka na oslonce Charpy-evog bata

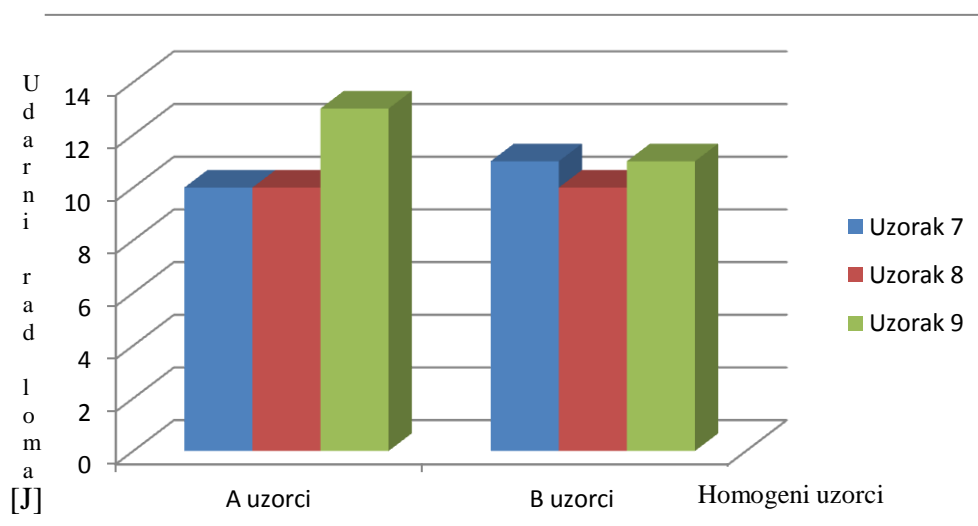


**Slika 62.** Homogeni ispitni uzorci nakon loma

U tablici 10 navedeni su rezultati udarnog rada loma za homogene ispitne uzorke, zajedno sa pripadajućom aritmetičkom sredinom i standardnom devijacijom  $S$ . Također je dan i dijagramski prikaz rezultata (slika 63).

**Tablica 10.** Rezultati mjerenja udarnog rada loma homogenih uzoraka

Ispitni uzorak	Udarni rad loma [J]
A7	10
A8	10
A9	13
$\bar{x}$	11
$S$	1,41
B7	11
B8	10
B9	11
$\bar{x}$	10,66
$S$	0,47



**Slika 63.** Prikaz vrijednosti udarnog rada loma homogenih uzoraka u Joulima [J]

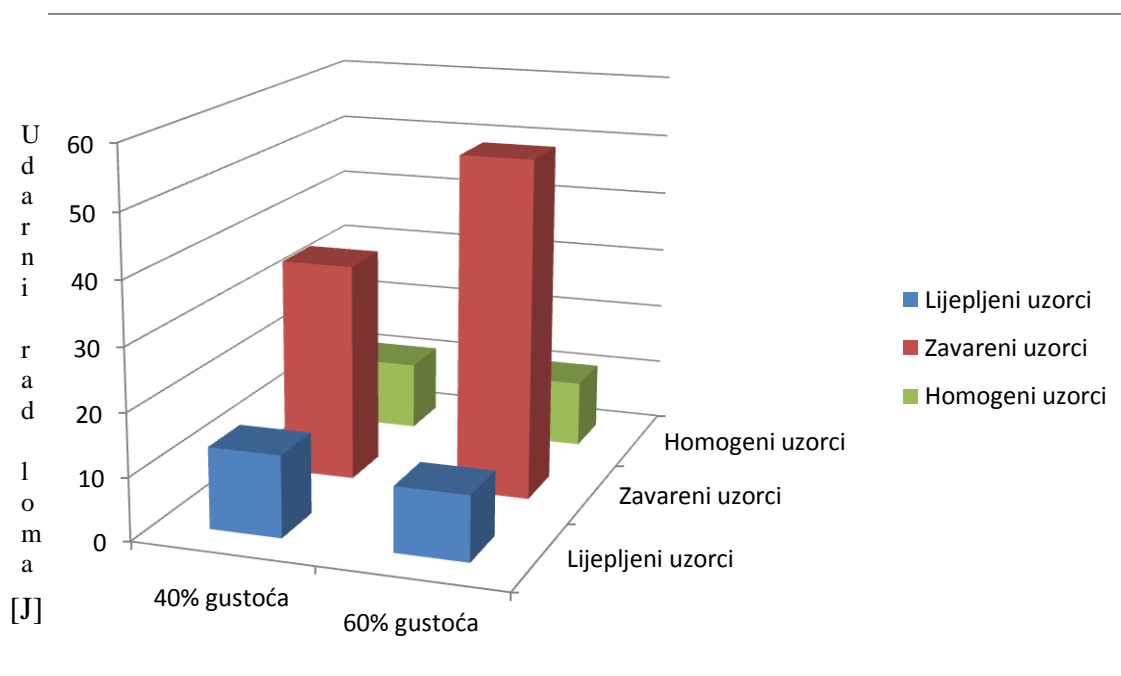
Analizirajući dobivene rezultate može se uočiti da je razlika među vrijednostima neznatna. Na temelju provedenog pokusa ne može se zaključiti koja gustoća pokazuje bolje, a koja lošije rezultate udarnog rada loma. Za konkretan odgovor na pitanje koja je gustoća aluminijskih pjena žilavija potrebno je provesti veći broj ispitivanja sa većim brojem ispitnih uzoraka.

#### 6.4.1.4. Ukupni prikaz rezultata i usporedba vrijednosti

Nakon što su provedena sva ispitivanja te navedeni rezultati po kategorijama u tablici 11 dan je ukupni prikaz rezultata ispitivanja udarnog rada loma na ispitnim uzorcima od aluminijske pjene. U tablici su prikazane vrijednosti aritmetičkih sredina odnosno srednje vrijednosti od tri mjerenja. Ukupni rezultati su prikazani i dijagramski na slici 64.

**Tablica 11.** Ukupni prikaz rezultata ispitivanja udarnog rada loma u Joulima [J]

	Lijepljeni ispitni uzorci	Zavareni ispitni uzorci	Homogeni ispitni uzorci
40% gustoća	13	35	11
60% gustoća	10,33	54	10,66



**Slika 64.** Ukupni prikaz vrijednosti udarnog rada loma u Joulima [J]

## 7. ZAKLJUČAK

Metalne pjene su zanimljiv konstrukcijski materijal koji nije još dovoljno istražen s obzirom na svoje potencijale. Metalne pjene imaju dokazano odlična mehanička svojstva pa je opravdano očekivati njihovu sve veću primjenu. Kako raste njihova primjena tako se sve više javlja i potreba za njihovim međusobnim spajanjem.

U ovom radu zadatak je bio ispitati mogućnosti spajanja aluminijskih metalnih pjena. Napravljeno je dvanaest ispitnih uzoraka aluminijskih pjena sastava AlSi10, dviju različitih gustoća, koji su spojeni postupcima lijepljenja i TIG zavarivanja. Također je napravljeno i šest homogenih ispitnih uzoraka, istog sastava, koji su se uspoređivali sa lijepljenim i zavarenim uzorcima. Nakon što su izvršeni navedeni postupci spajanja na ispitnim uzorcima proveden je postupak ispitivanja udarnog rada loma spoja. Isto tako, udarni rad loma je ispitan i na homogenim ispitnim uzorcima te su rezultati uspoređeni sa onima lijepljenih i zavarenih ispitnih uzoraka.

Na temelju provedenih ispitivanja može se zaključiti slijedeće:

- lijepljenje i zavarivanje su pogodne metode spajanja aluminijskih pjena. To dokazuju dobiveni rezultati koji pokazuju da je čvrstoća lijepljenog i zavarenog spoja veća od čvrstoće homogenih uzoraka, odnosno same aluminijske pjene,
- u slučaju velikog naprezanja do loma bi došlo pored spoja, a ne na samom spoju,
- zavareni spojevi pokazuju daleko najbolje rezultate, odnosno mnogo veće vrijednosti čvrstoće u odnosu na lijepljene spojeve i homogene uzorke,
- za lijepljenje su pogodnije metalne pjene veće poroznosti, jer više ljepila može ući u pore i na taj način tvoriti čvršći spoj,
- za razliku od lijepljenja kod zavarivanja je bolje da aluminijska pjena bude čim veće gustoće, odnosno sa što manjim porama. Naime, aluminijske pjene veće gustoće sadrže više materijala, te imaju deblju koru, što je pogodnije za zavarivanje,
- prilikom analize dobivenih rezultata također se primjećuje da dolazi do velikog rasipanja podataka i to kod ispitivanja uzoraka iste vrste, što još jednom dokazuje nepredvidivost građe same pjene. Pri istom načinu ispitivanja aluminijskih pjena



rezultati često variraju i za nekoliko postotaka, što smanjuje povjerenje u aluminijske pjene u primjeni. Ako bi se htjelo dobiti što vjerodostojnije podatke potrebno bi bilo provesti veći broj različitih ispitivanja na većem broju ispitnih uzoraka.

## LITERATURA

- [1] T. Filetin, I. Kramer, G. Marić: «*Metalne pjene - proizvodnja, svojstva i primjena*», Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2003.
- [2] <http://www.metalfoam.net/> 14.12.2012.
- [3] G. Marić, I. Kramer, Ž. Alar: „*Primjena metalnih pjena*“ Zbornik međunarodnog savjetovanja „Zavarivanje u pomorstvu“, Hvar, 2004.
- [4] [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/af/Metal\\_Foam\\_in\\_Scanning\\_Electron\\_Microscope%2C\\_magnification\\_10x.GIF](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/af/Metal_Foam_in_Scanning_Electron_Microscope%2C_magnification_10x.GIF) 16.12.2012.
- [5] H. Haferkamp, J. Bunte, D. Herzog and A. Ostendorf: «*Laser based welding of cellular aluminium*», Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 9, No. 1, Germany, 2004.
- [6] [titan.fsb.hr/~tfiletin/pdf/metalne\\_pjene\\_tehn\\_razvoj.pdf](http://titan.fsb.hr/~tfiletin/pdf/metalne_pjene_tehn_razvoj.pdf), 20.12.2012.
- [7] <http://en.metalfoam.de/processing/> 20.12.2012.
- [8] Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti; *Bilten razreda za tehničke znanosti*, broj 2, godište X, 2009.
- [9] F. Simančik, R. Florek: «*Reinforced aluminium foams – promising solution for lightweight load – bearing parts*», Metfoam 2005.
- [10] M. F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley: «*Metal foams: A design guide*», Butterworth-Heinemann, Woburn, USA, 2000
- [11] S. Kralj, Z. Kožuh, M. Bušić: „*Pregled tehnologija proizvodnje i spajanja metalnih pjena*“, Zbornik radova: „EUROJIN 8“ Međunarodno savjetovanje, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Pula, svibanj 2012
- [12] N. Sedliakova, F. Simančik, J. Kovačik, P. Minar: «*Joining of aluminium foams*», Proceeding of Symposium Metallschaume, Bremen, 1997., p. 177 – 185
- [13] F. Simančik, R. Florek: «*Reinforced aluminium foams – promising solution for lightweight load – bearing parts*», Metfoam 2005.
- [14] Alulight AFS GmbH: «*Aluminium-Foam-Sandwich (AFS)*», Germany; <http://www.alulight.com> 27.12.2012.
- [15] F. Simančik, J. Kovačik, N. Minarikova: «*Bending properties of foamed aluminium panels and sandwiches*», MRS Symposium Proceedings (Ed. by. D.S. Schwartz, D.S. Shih, A.G. Evans)

- [16] H.P. Degischer, B. Kriszt: «*Secondary treatment of cellular metals*», Handbook of cellular metals: Production, Processing, Applications., 2002 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA ISBNs: 3-527-30339-1
- [17] F. Simančik, F. Schoerghuber: «*Complex foamed aluminium parts as permanent cores in aluminium castings*», MRS Symposium Proceedings (Ed. by. D.S. Schwartz, D.S. Shih, A.G.Evans and H.N.G. Wadley ), Vol. 521, Materials Research Society, Warrendale, Pennsylvania, 1998., p. 151
- [18] Z. Kožuh, S. Kralj, Ž. Cvirn: *Tehnologija lijepljenja, Dio I. Zavarivanje*, 1997., 40/3., 85-94
- [19] 3M Scotch-Weld™: *Epoxy Adhesives DP190 Translucent and Gray*; April, 2010
- [20] S. Kralj, Š. Andrić: „*Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka*“, Zagreb, 1992.
- [21] [http://newsroom.lincolnelectric.com/images/9026/media\\_gallery/SquareWaveTIG175237C9B72high.jpg](http://newsroom.lincolnelectric.com/images/9026/media_gallery/SquareWaveTIG175237C9B72high.jpg) 02.02.2013.
- [22] O'Brien R. L.: „*Welding Handbook*, Welding processes, eighth edition, vol.2“, Miami, 1991.
- [23] Franz. M: «*Mehanička svojstva materijala*», Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.